

第38回宇宙線国際会議一般講演会
ヴィクトール・フランツ・ヘス記念講演

2023年7月30日

光で見えない宇宙をみる

(主に日本も関係している「宇宙線」に関係した観測
研究の話をします。)

東京大学宇宙線研究所

梶田隆章

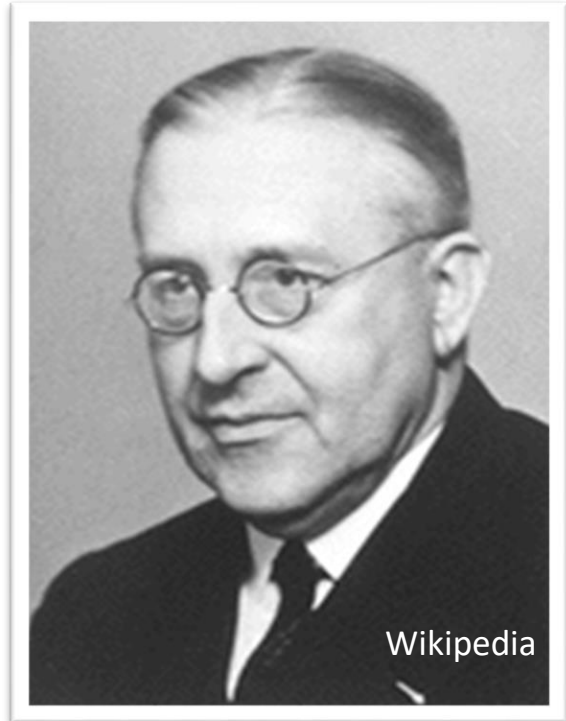
- はじめに
- ニュートリノでみる宇宙
- ガンマ線でみる宇宙
- ニュートリノでみる宇宙(2)
- 宇宙線でみる宇宙
- 重力波でみる宇宙
- 光ではわからない宇宙の謎
- まとめ

はじめに

宇宙線の発見 (1912年)



Victor Hess



放射線強度を気球に乗って
観測

→ 高度が高くなればなるほど
強度が強くなる。

→ 宇宙からの放射線(宇宙
線)の発見

✓ 光では見えない宇宙の発見

✓ 宇宙線はどこでどのようにつくられているの？

超新星爆発(1987年2月23日)

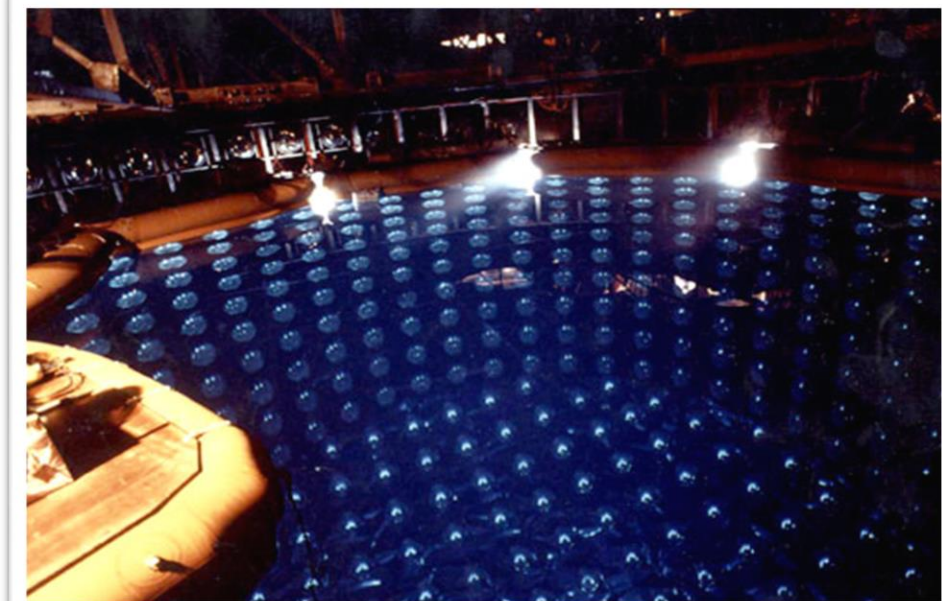
SN1987A
爆発前



爆発後



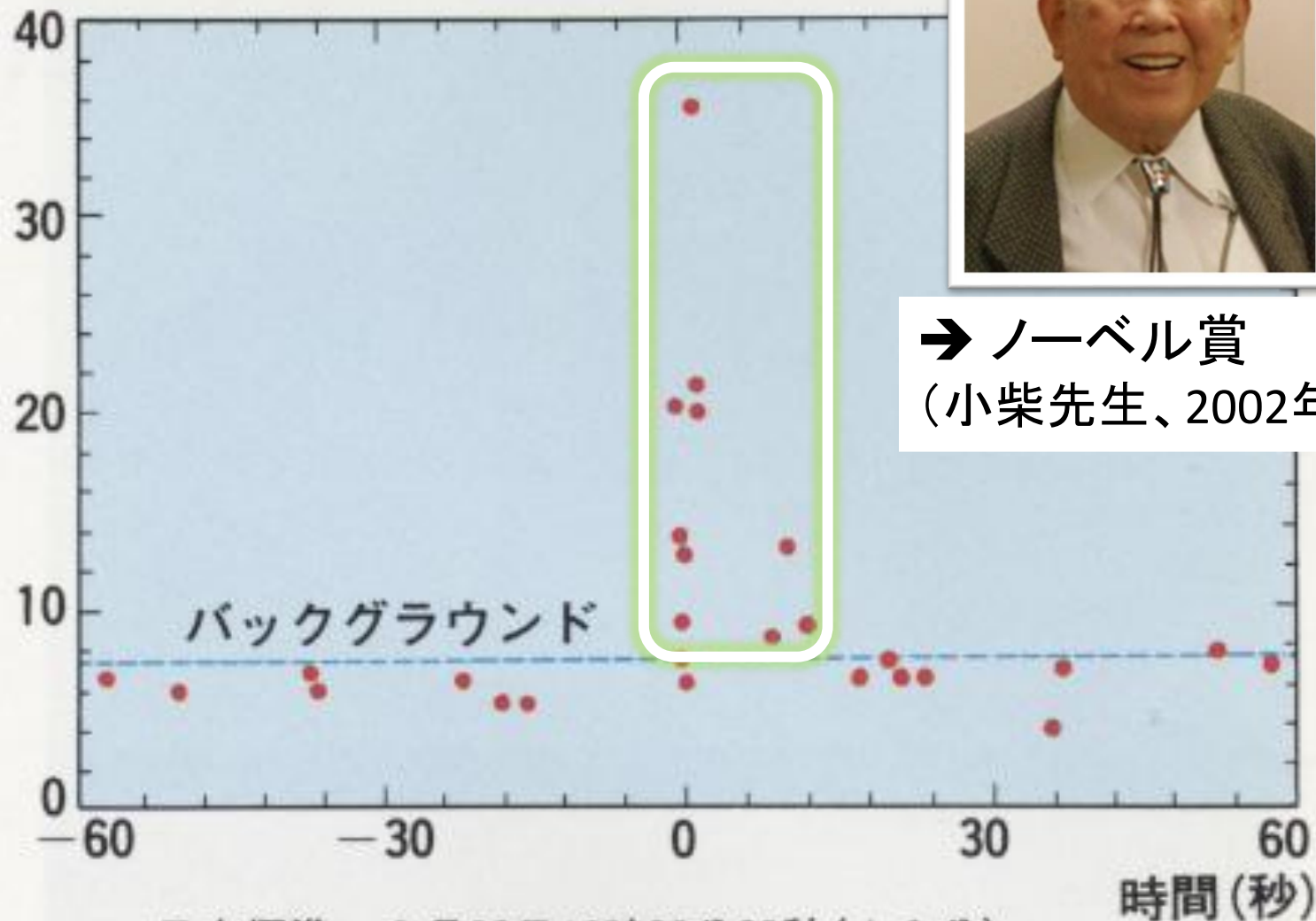
ニュートリノ宇宙観測のはじまり



カミオカンデ3000トン測定器

超新星爆発のメカニズムの解明（重い星がその最後に自らの重力でつぶれ、その反動で星の外側が爆発する現象）

二次電子のエネルギー (MeV)



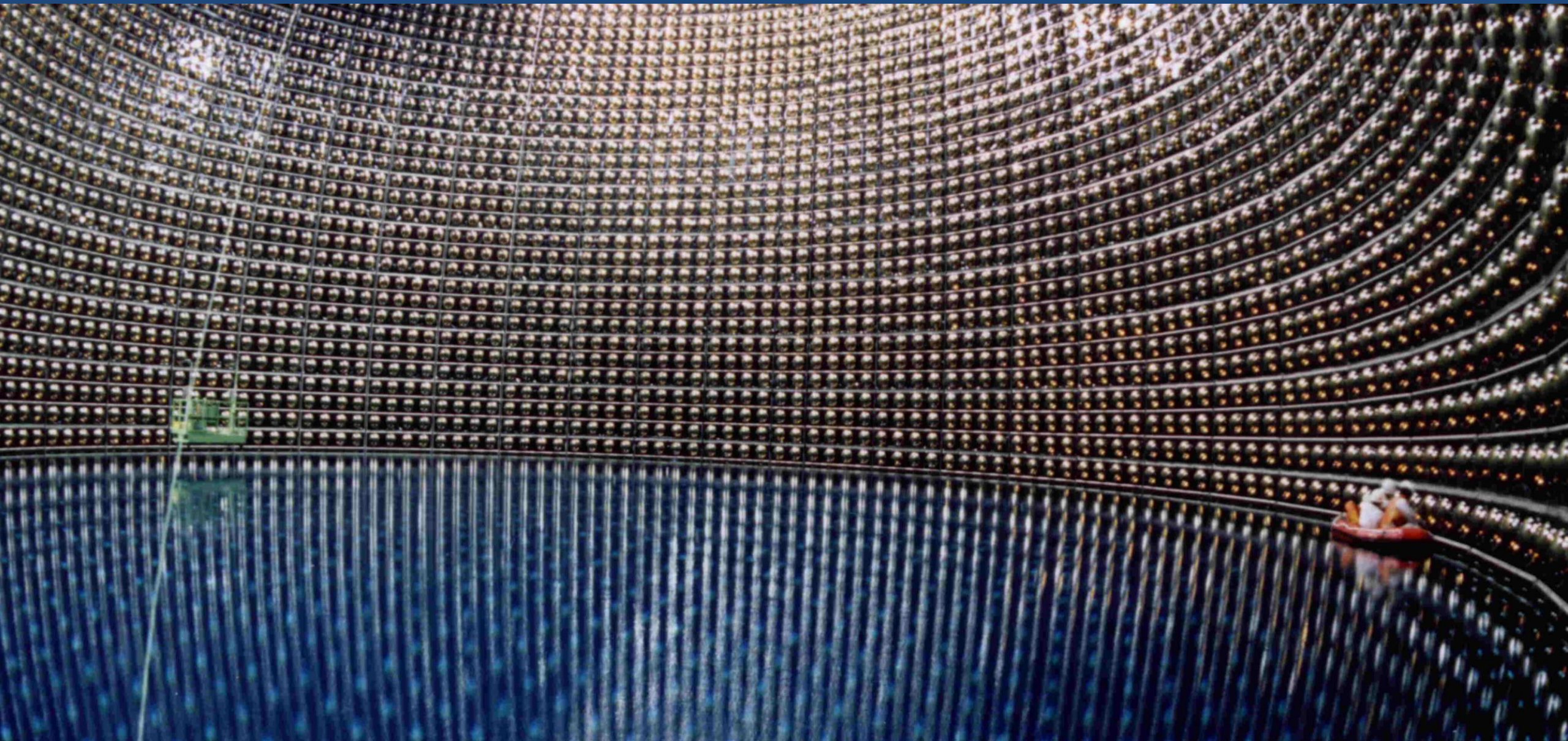
→ ノーベル賞
(小柴先生、2002年)



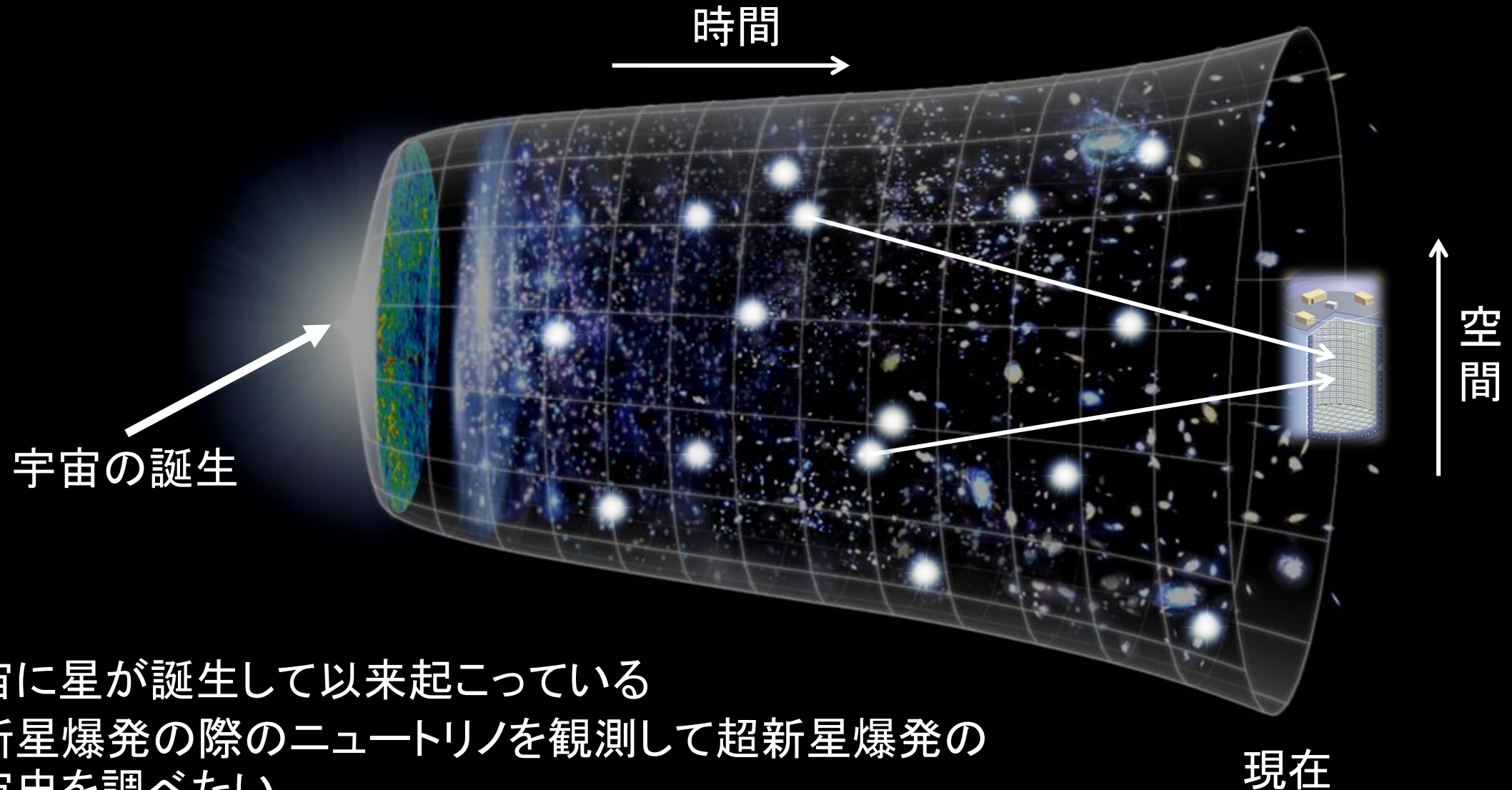
日本標準 2月23日16時35分35秒(±1分)

ニュートリノでみる宇宙

現在のニュートリノ観測装置:スーパーカミオカンデ



ニュートリノで超新星爆発の歴史を探る



宇宙に星が誕生して以来起こっている
超新星爆発の際のニュートリノを観測して超新星爆発の
宇宙史を調べたい。

スーパーカミオカンデの改造

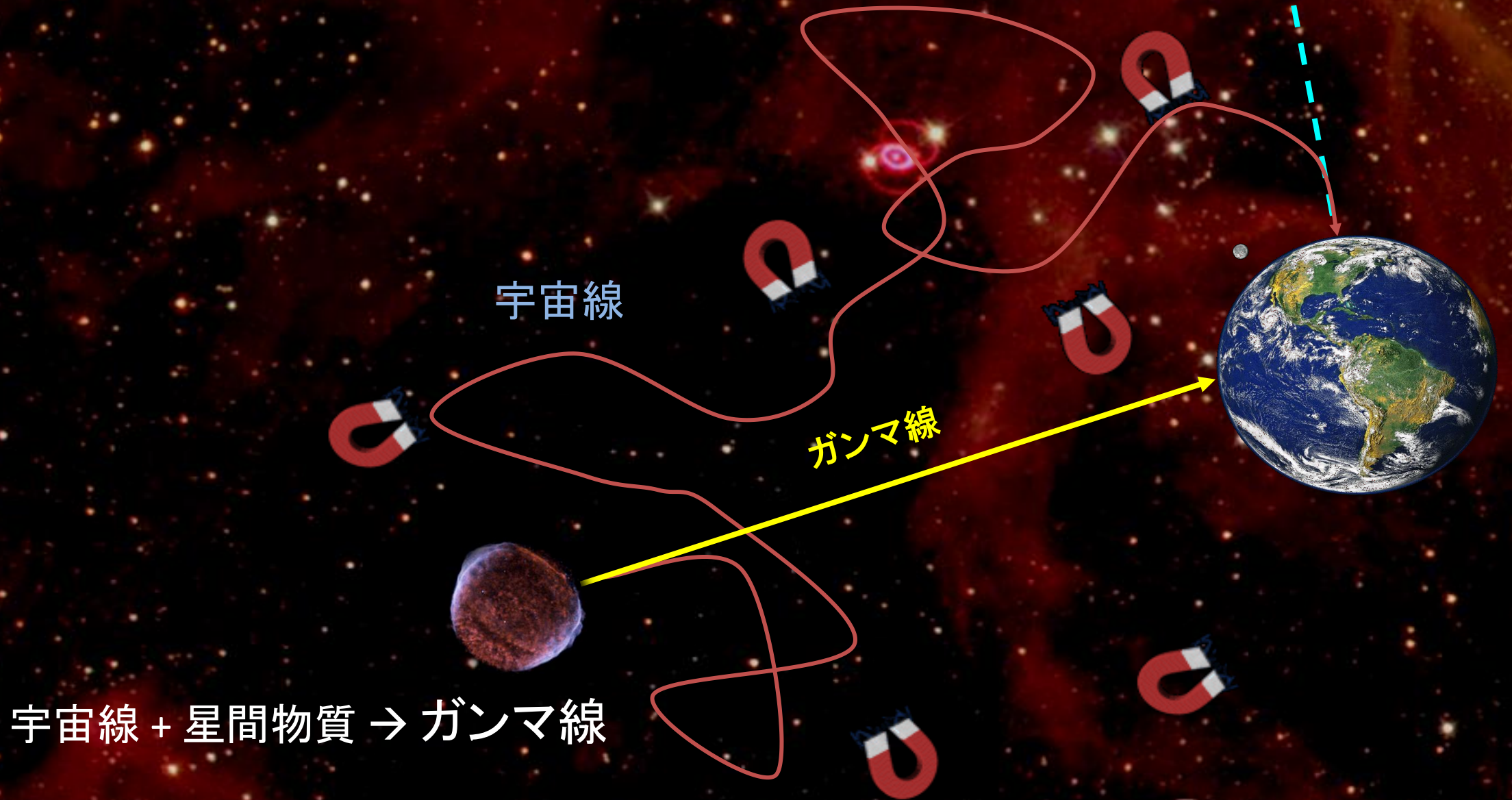
写真: 宇宙線研神岡宇宙素粒子研究施設提供



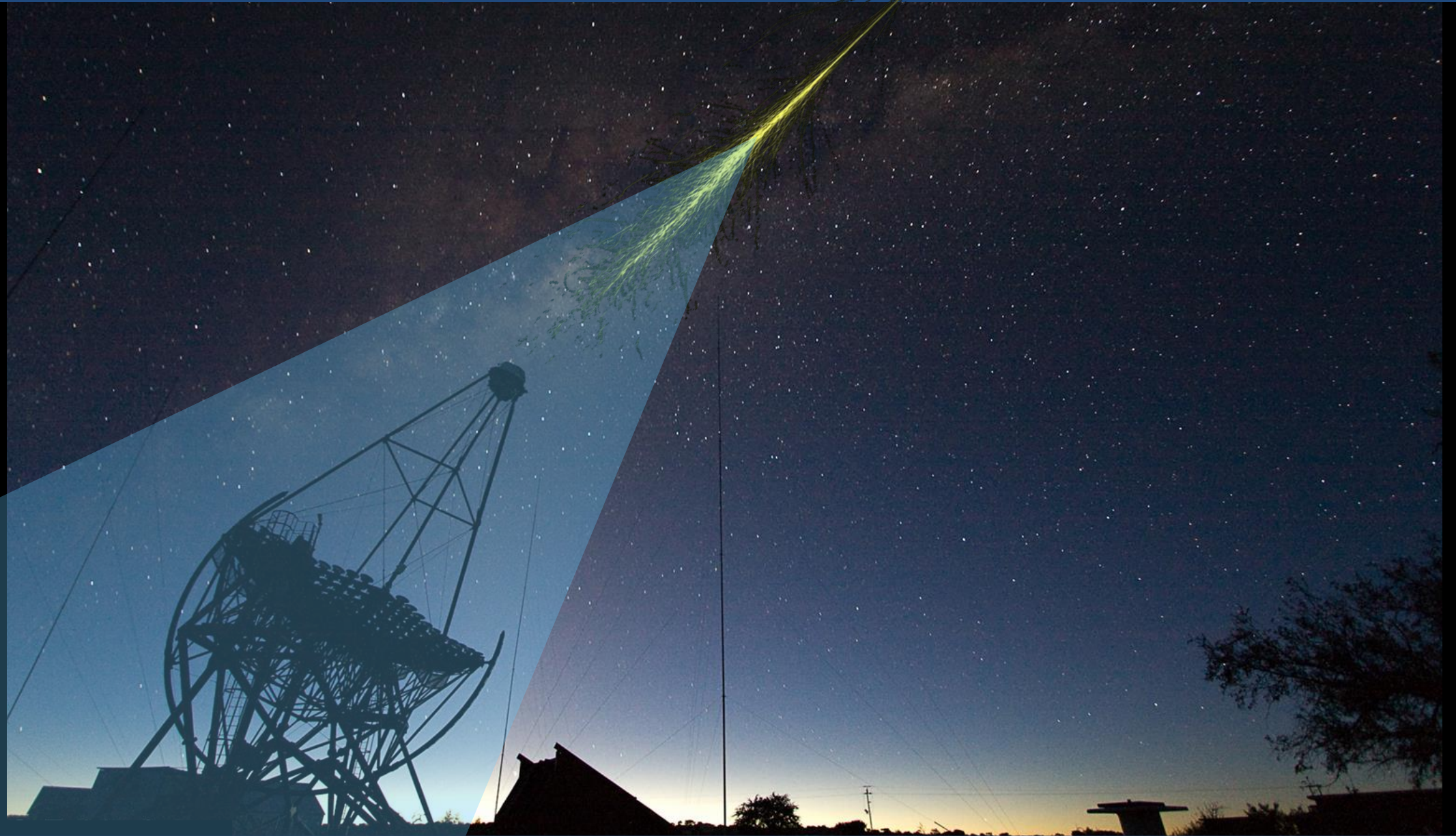
そのため、ガドリニウムを純水中に溶かして、スーパーカミオカンデの感度をあげる改造をしました。写真はガドリニウムを溶かした純水用の特別な巨大純水装置。結果にご期待を。

ガンマ線で探る宇宙

宇宙線がどこで作られたかを知りたい:ガンマ線



高エネルギーガンマ線の観測



ガンマ線望遠鏡の例

スペイン領カナリー諸島ラパルマ島



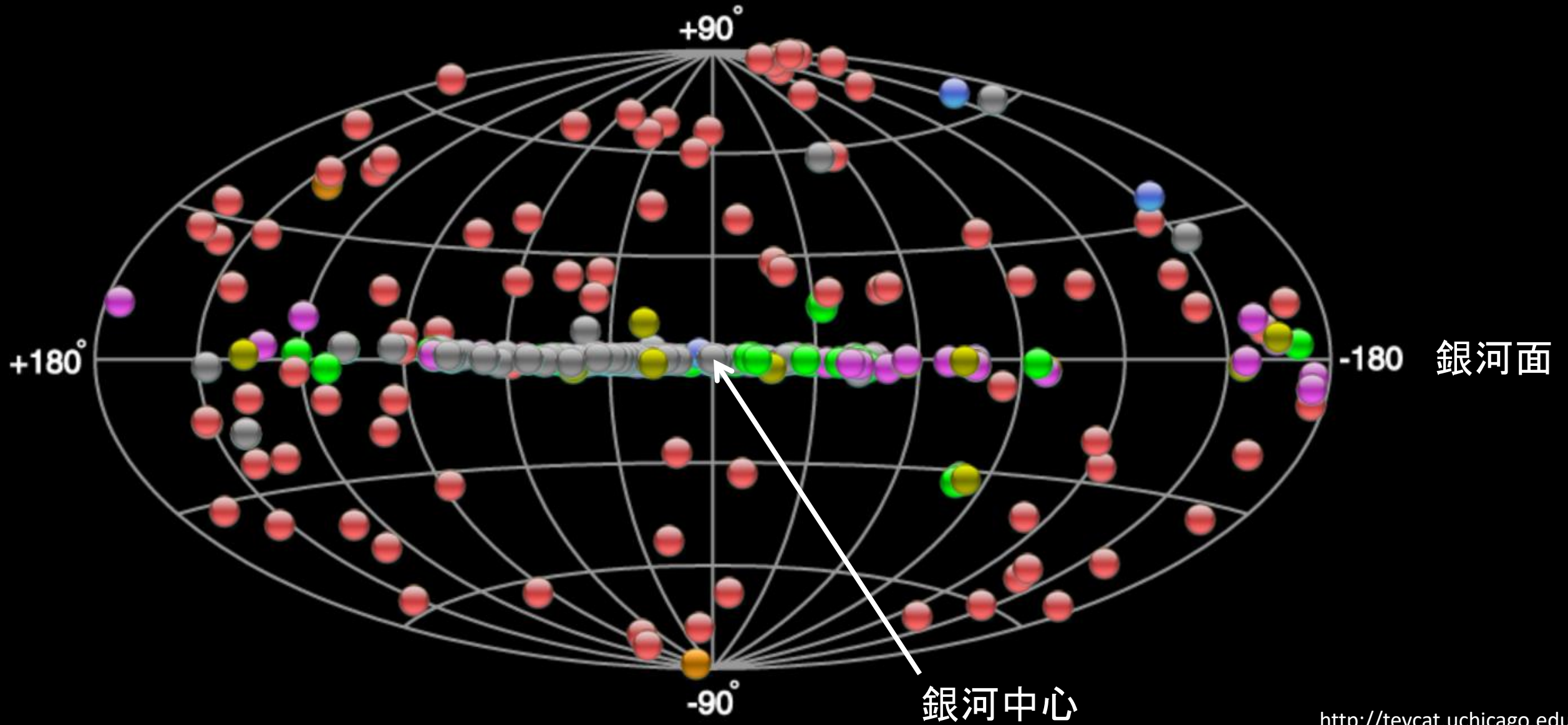
MAGIC-II

MAGIC-I

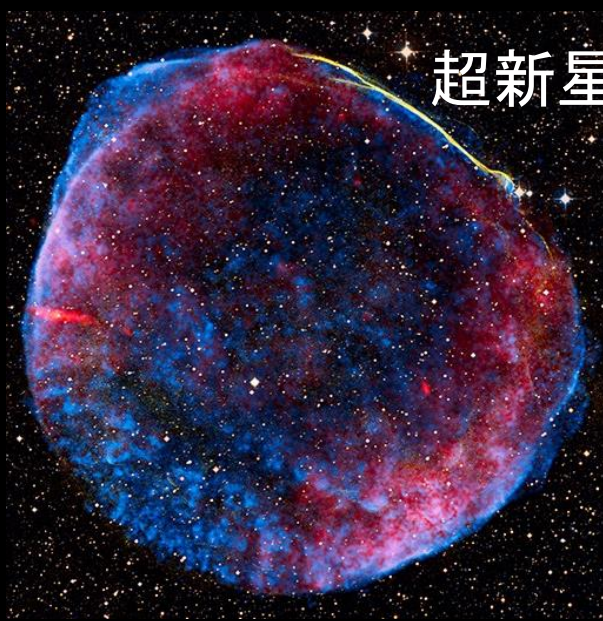
CTA-LST初号機

写真提供: 宇宙線研 窪先生

ガンマ線が来る方向



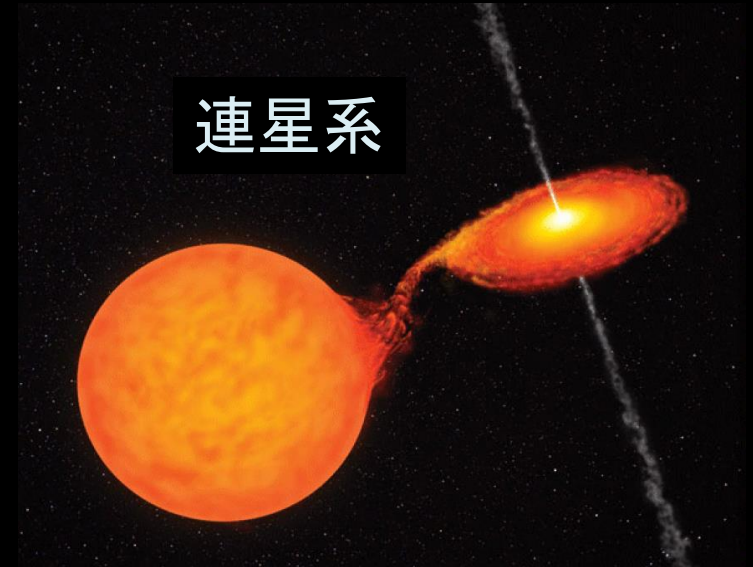
高エネルギーガンマ線が生まれる(そうな)ところ



超新星残骸



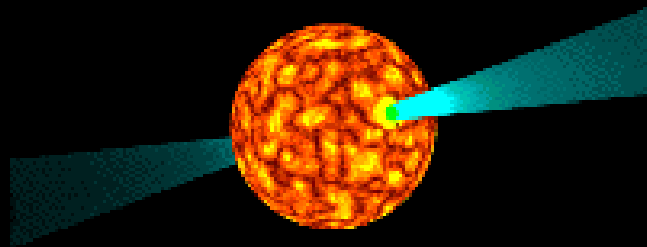
銀河の中心の巨大
ブラックホール



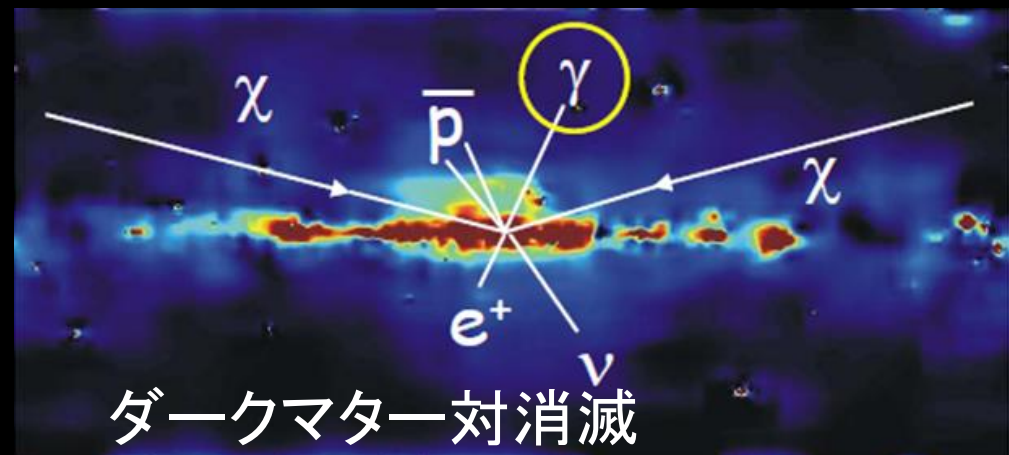
連星系



ガンマ線バースト



パルサー



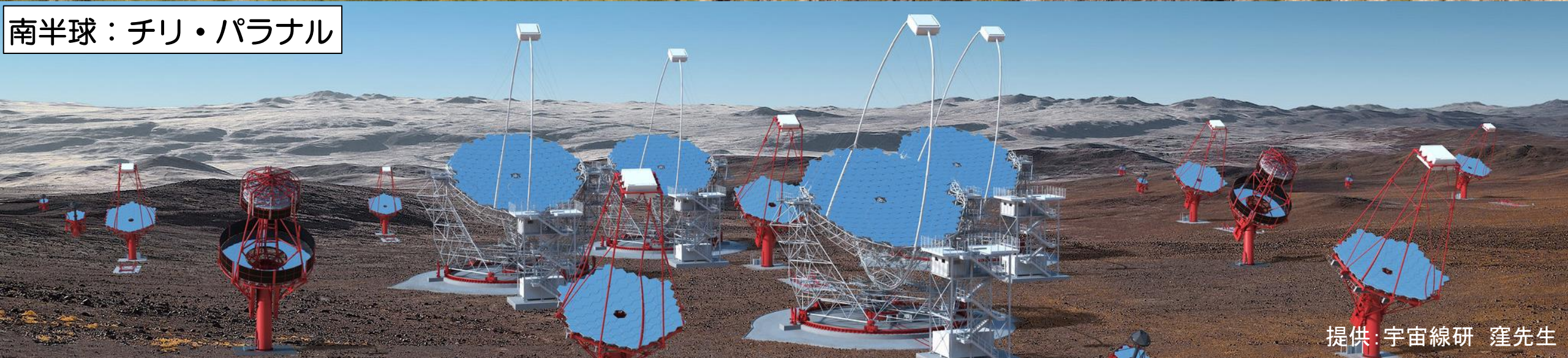
ダークマター対消滅

ガンマ線望遠鏡 CTA の完成予想図

北半球：スペイン・ラパルマ島



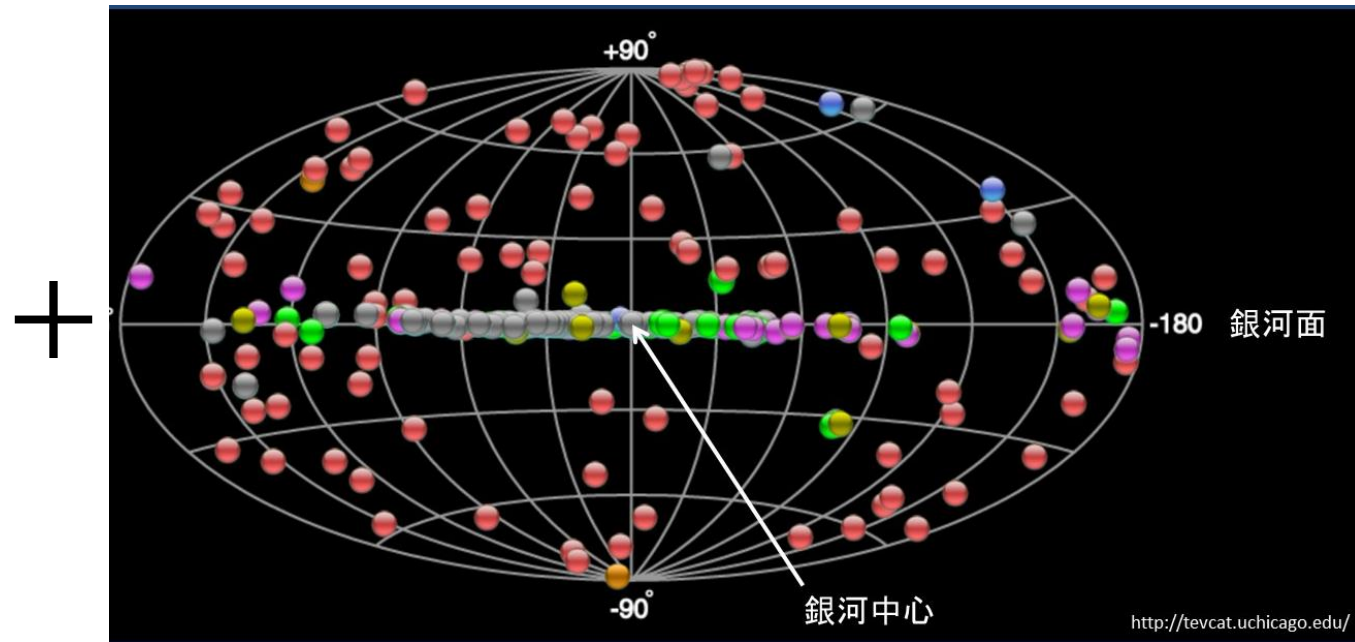
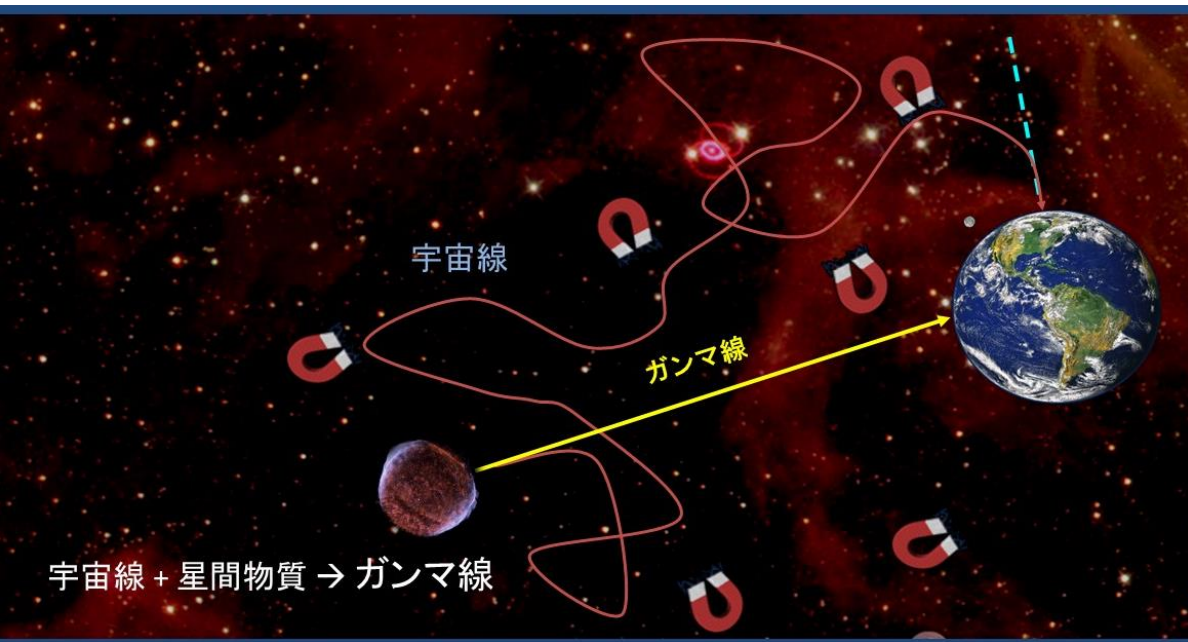
南半球：チリ・パラナル



提供：宇宙線研 窪先生

世界協力で南北半球それぞれに巨大な望遠鏡群を建設。北半球はスペイン・ラパルマ島で建設中。

宇宙線の起源？



宇宙線は、銀河系でつくられているの？

今のところの答え：そうかもしれないし、そうでないかもしれない。

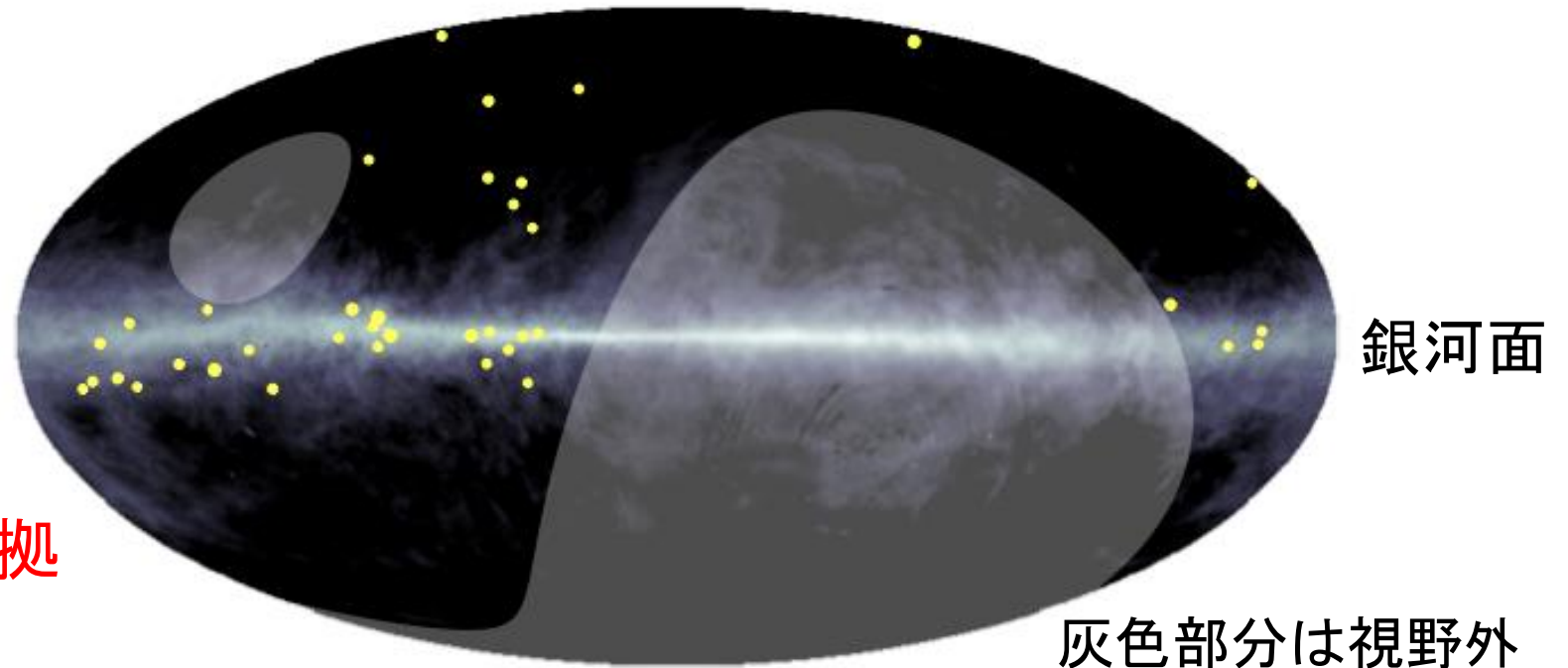
理由：宇宙線は陽子や原子核。でも加速された電子からもガンマ線はつくられるため。

宇宙線の起源？



日中協力の
宇宙線観測
装置
(中国チベット
高原)

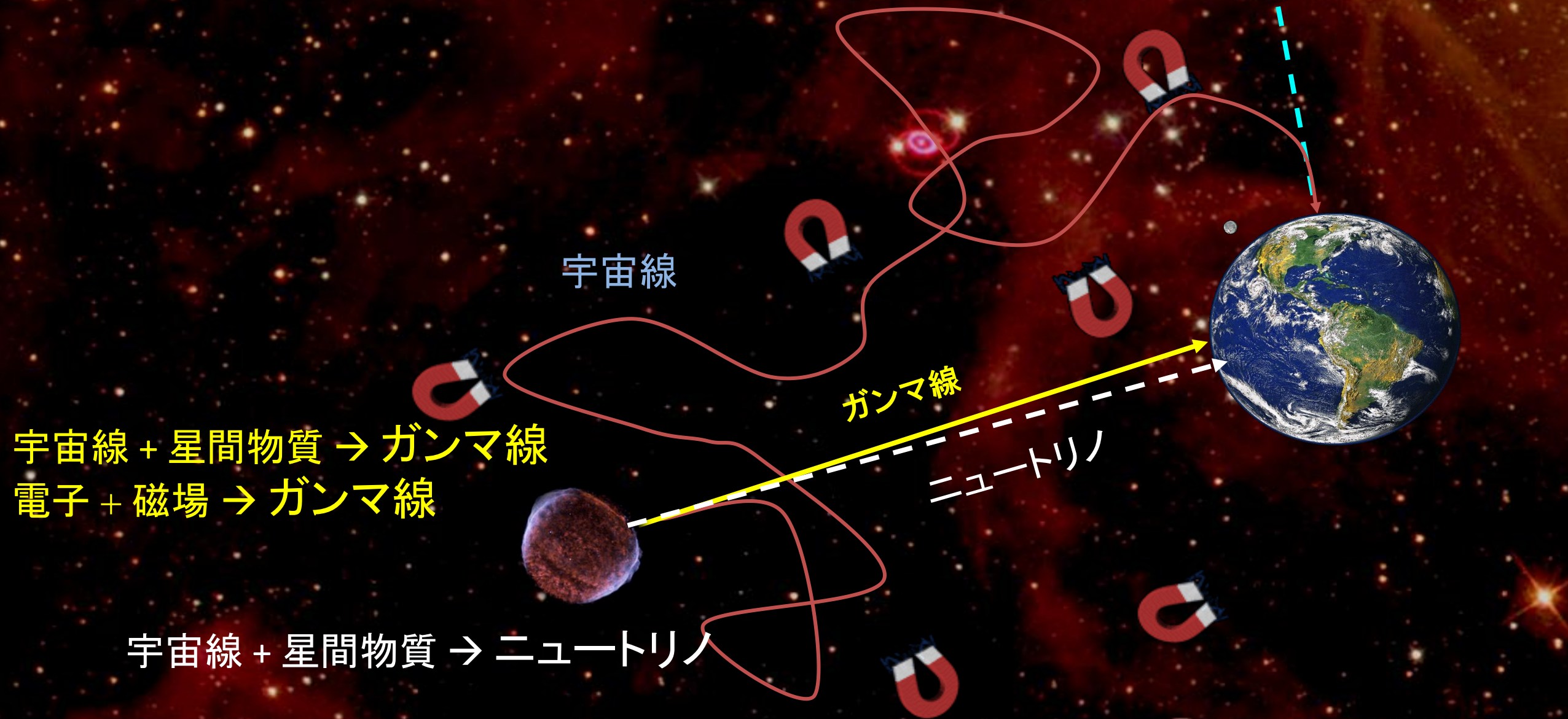
1990年代から稼働していたこの装置を改造して、宇宙線のノイズを100万分の1まで除去して超高エネルギーガンマ線の観測に成功。



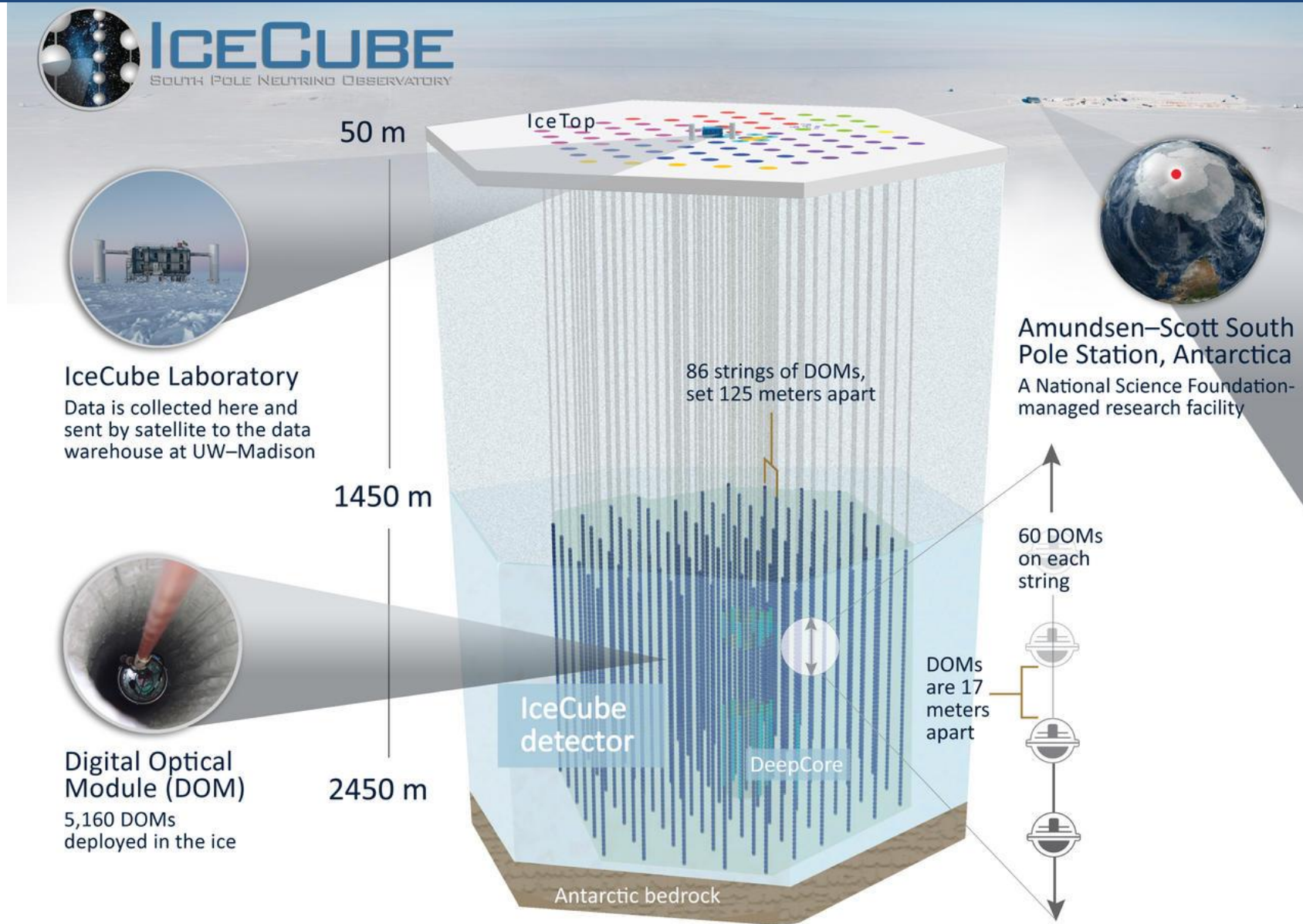
銀河系内での宇宙線加速の証拠
(2021年)

ニュートリノでみる宇宙(2)

宇宙線がどこで作られたかを知りたい:ニュートリノ



ニュートリノ観測: IceCube



吉田茂氏(千葉大)提供

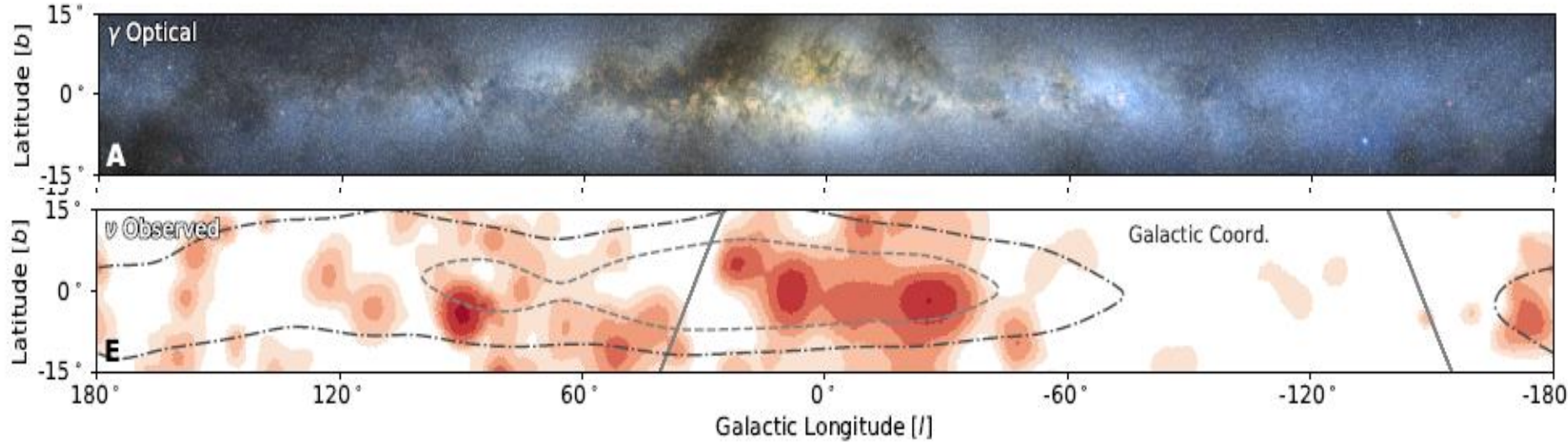
建設中のIceCube



吉田茂氏(千葉大)提供

IceCube : 銀河面からのニュートリノ(2023年)

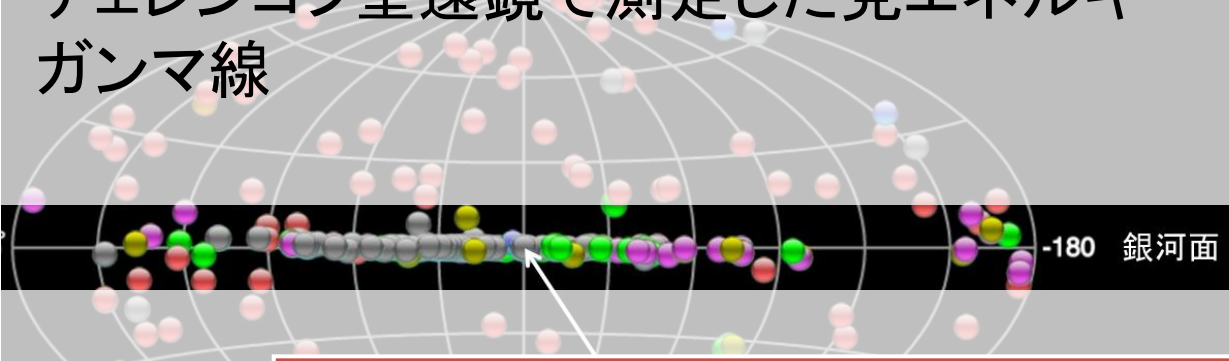
IceCube arXiv: 2307.04427



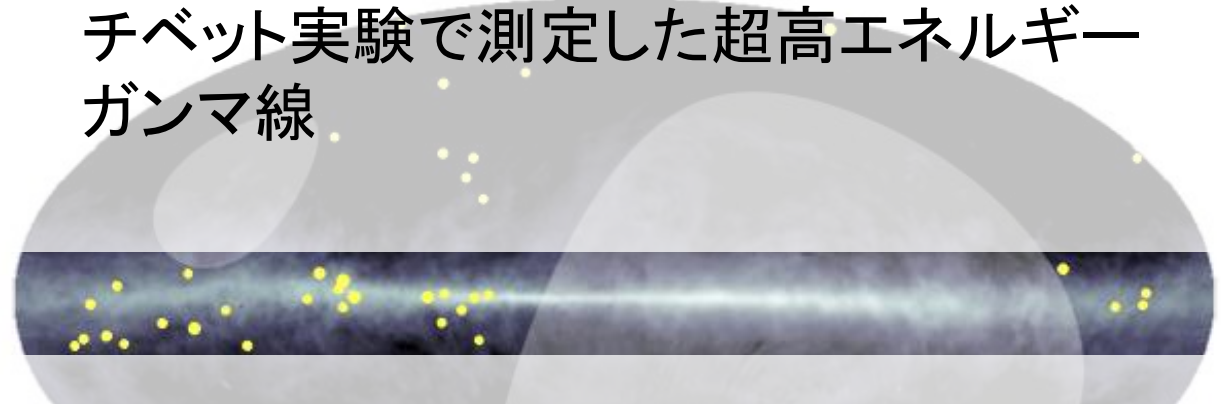
銀河面(光)

銀河面(ニュートリノ)

チェレンコフ望遠鏡で測定した高エネルギー
ガンマ線



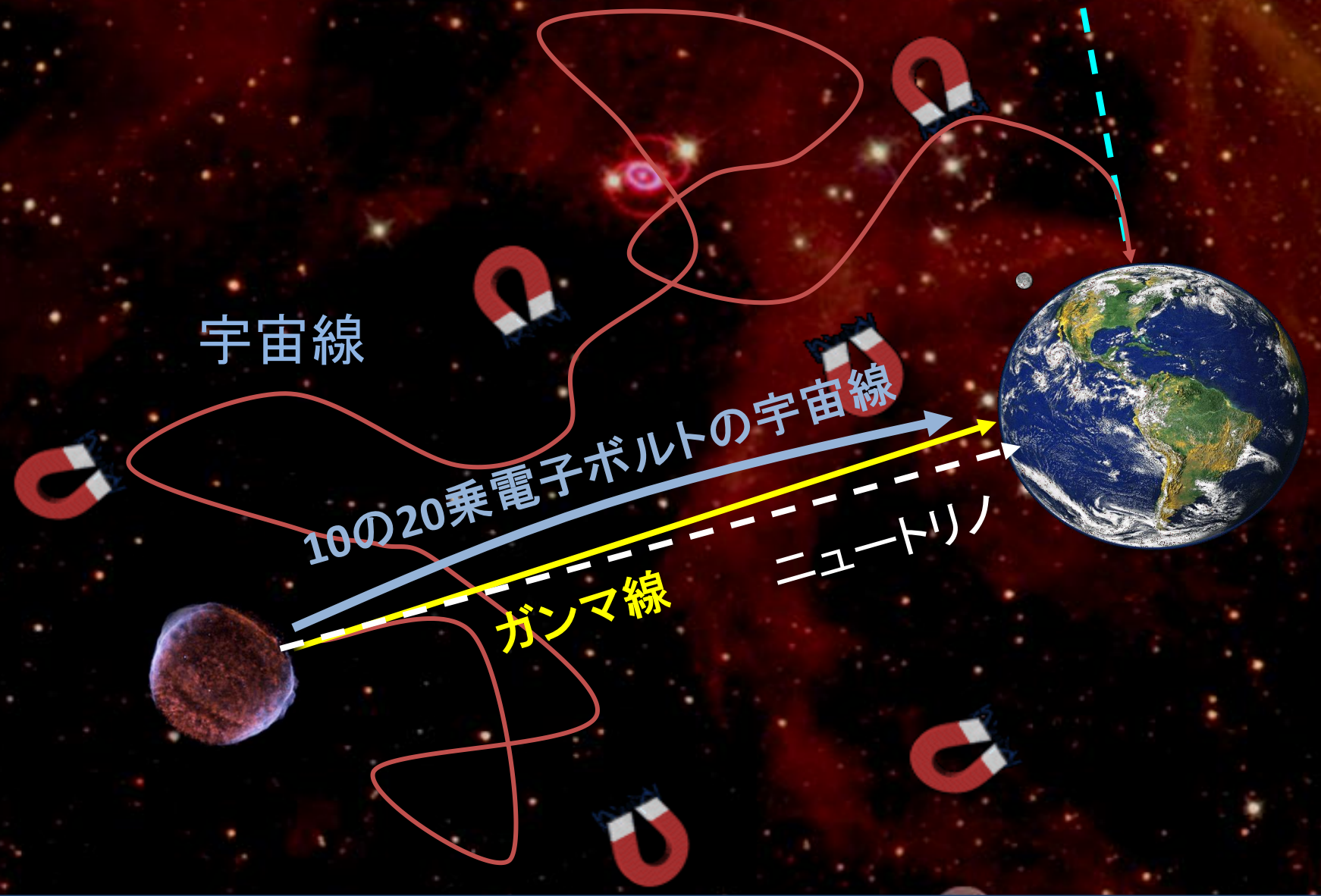
チベット実験で測定した超高エネルギー
ガンマ線



宇宙線(の少なくともその一部は)銀河系内で作られている!
100年来の謎が解明されつつある!

宇宙線で探る宇宙

宇宙線がどこで作られたかを知りたい: エネルギーの高い宇宙線



最高エネルギー宇宙線

■宇宙線のエネルギーは(少なくとも)10の20乗電子ボルト(10^{20} eV)まで延びています。

■10の20乗電子ボルトは、
右のボールくらい！



■陽子1個(あるいは鉄の原子核という人もいます)のエネルギーが、
なんでこんなに！

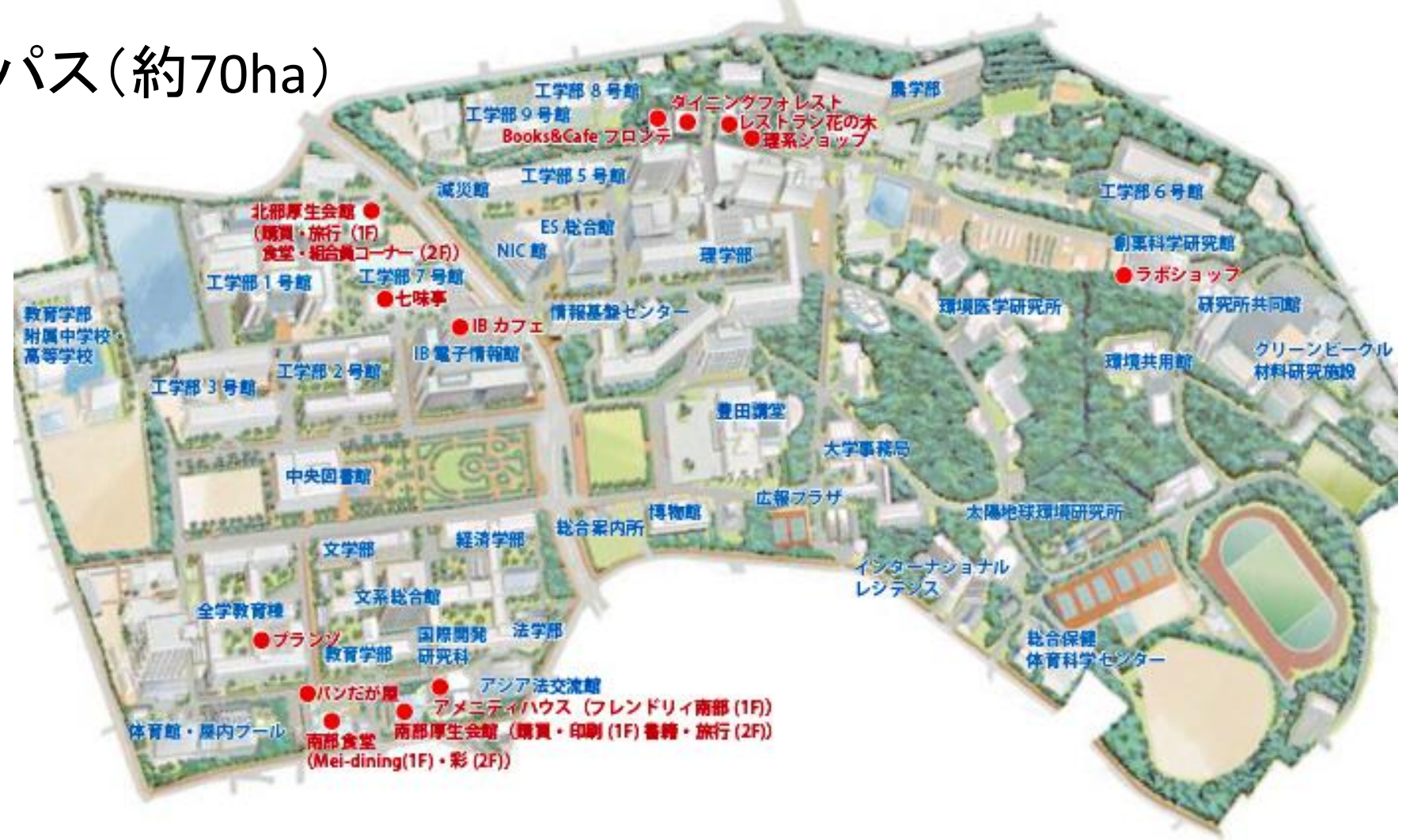
✓詳しく調べたい。

<https://www.sportingnews.com/jp/mlb/news/shohei-ohtani-2023-profile/sfuop36a8w2sbthsabnzjudw>

Getty Images

最高エネルギー宇宙線を調べたい。

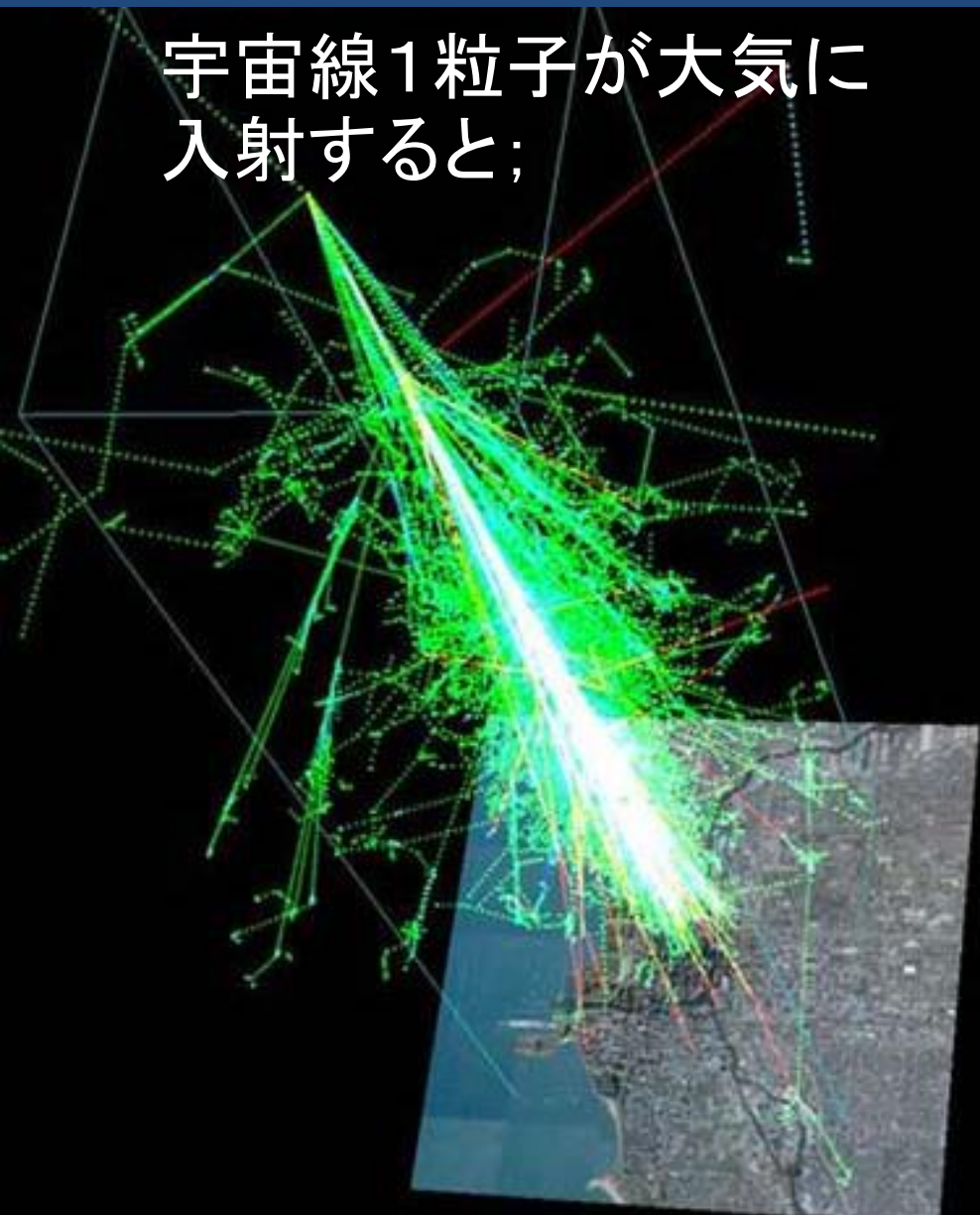
名古屋大学東山キャンパス(約70ha)



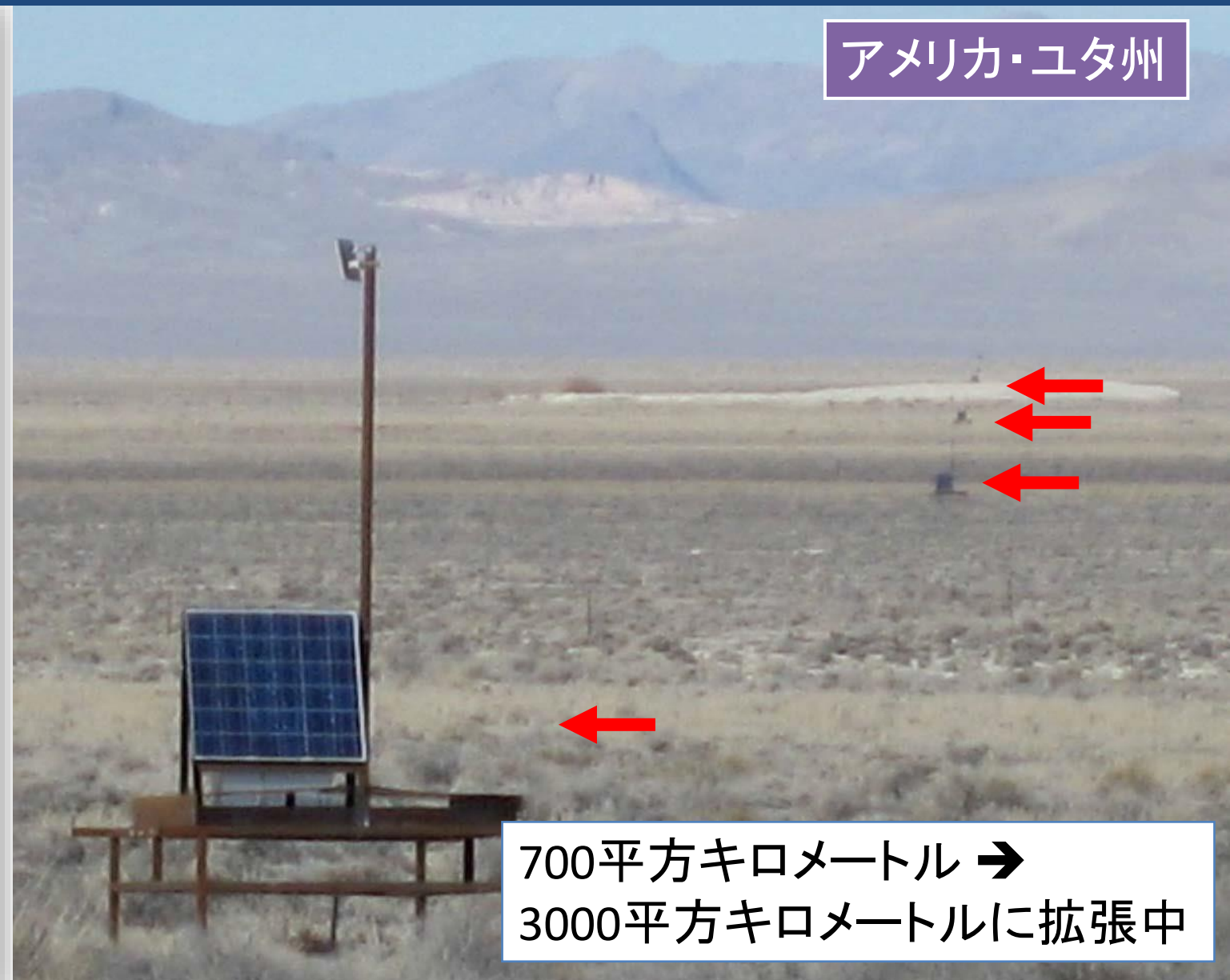
平安時代から今までに数個降ってきた....。

最高エネルギー宇宙線を測る

宇宙線1粒子が大気に入射すると;



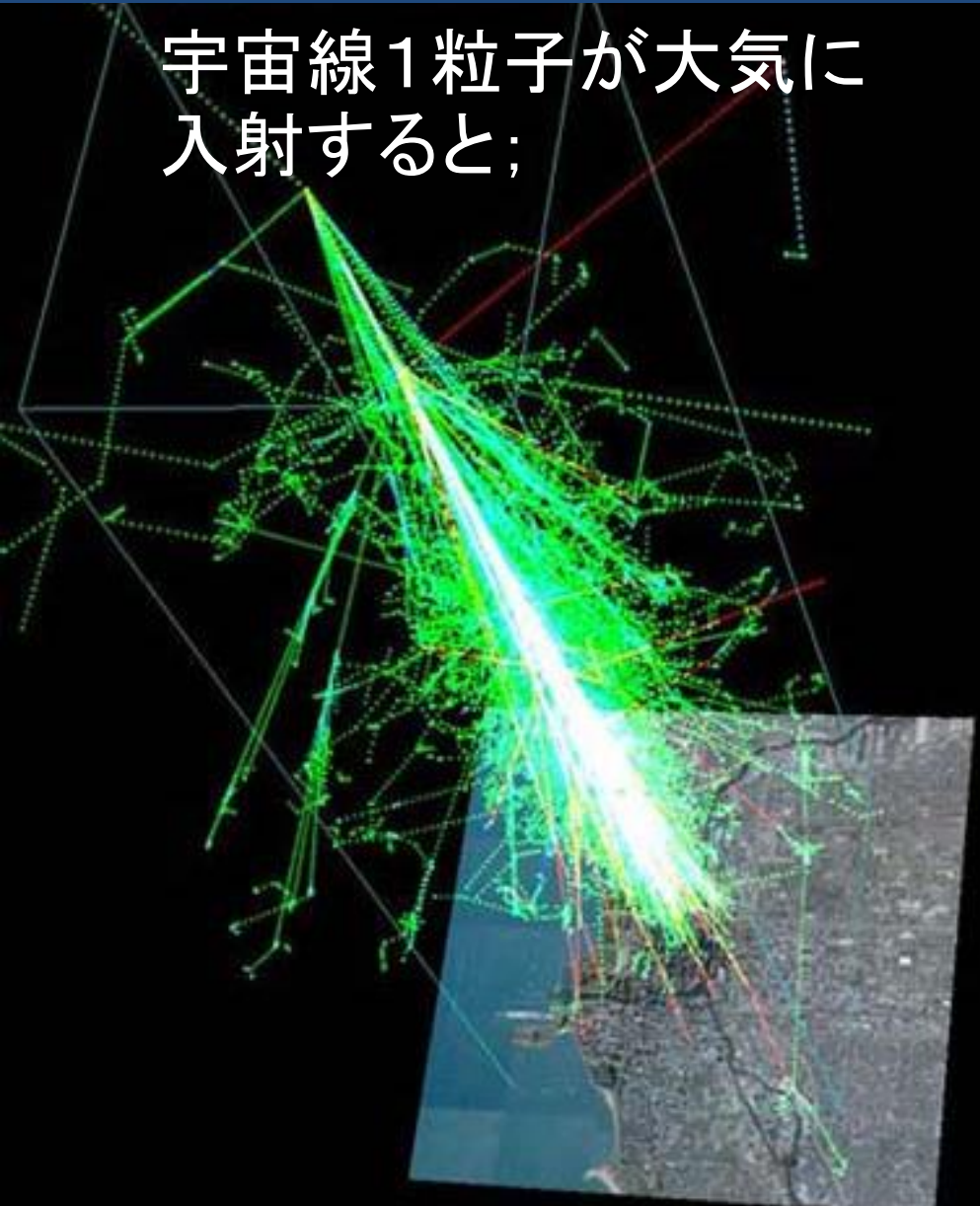
アメリカ・ユタ州



700平方キロメートル →
3000平方キロメートルに拡張中

最高エネルギー宇宙線を測る

宇宙線1粒子が大気に入射すると;



アルゼンチン (3000平方キロメートル)

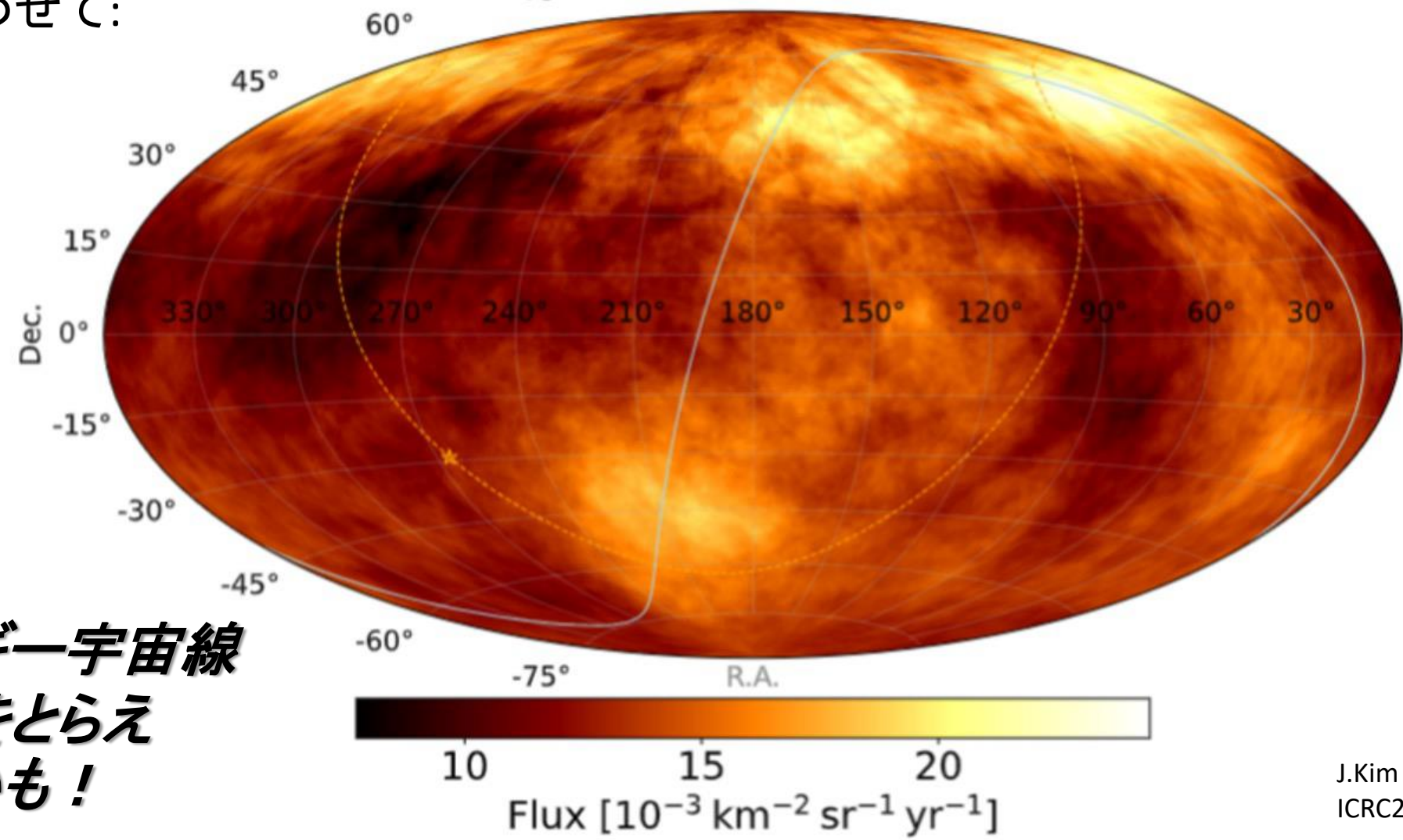


<https://www.auger.org/index.php/gallery/photos>

観測された最高エネルギー宇宙線が来た方向

北半球と南半球の測定器
のデータをあわせて:

$$\Phi(E_{\text{Auger}}^{\text{TA}} \geq \frac{48.2}{38} \text{ EeV}) - \Psi = 25^\circ$$

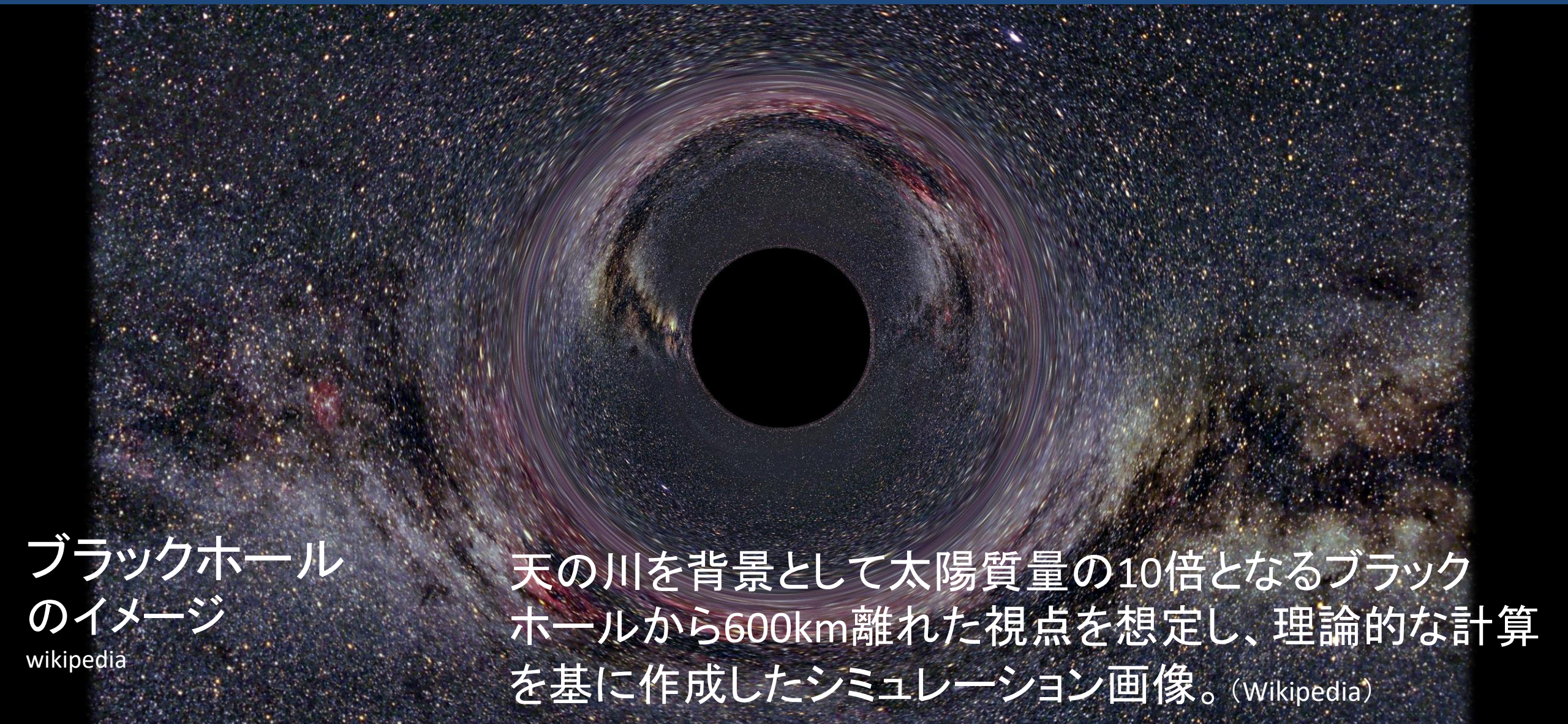


**最高エネルギー宇宙線
の生成現場をとらえ
つつあるのかも！**

J.Kim (for the TA collab.)
ICRC2023, highlight talk

重力波で探る宇宙

光で見えないもの

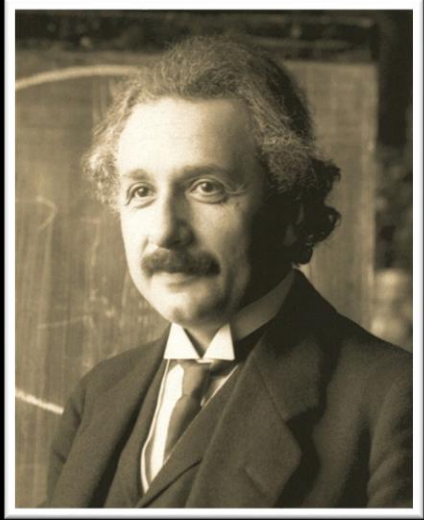


ブラックホール
のイメージ

wikipedia

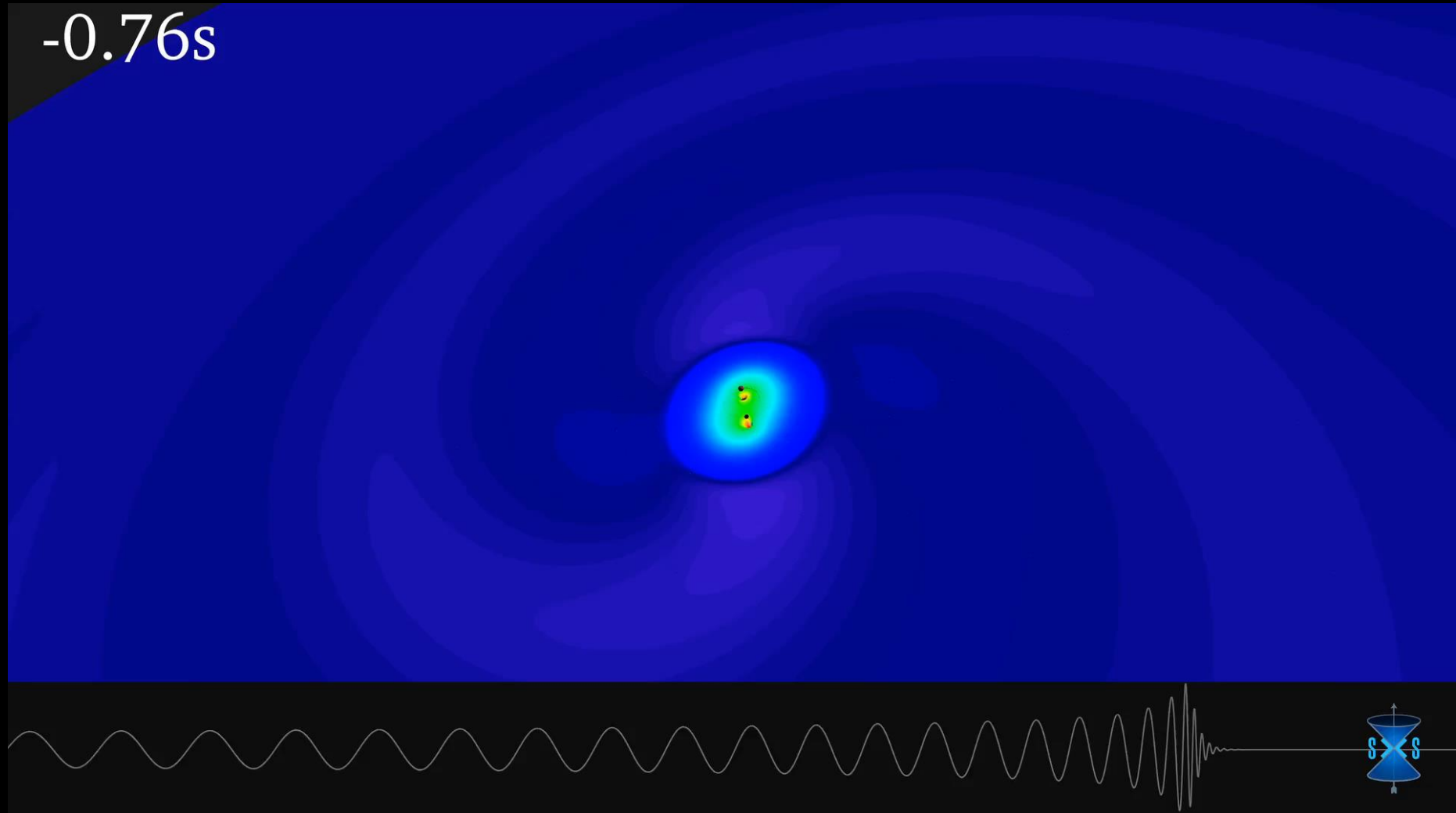
天の川を背景として太陽質量の10倍となるブラックホールから600km離れた視点を想定し、理論的な計算を基に作成したシミュレーション画像。(Wikipedia)

重力波

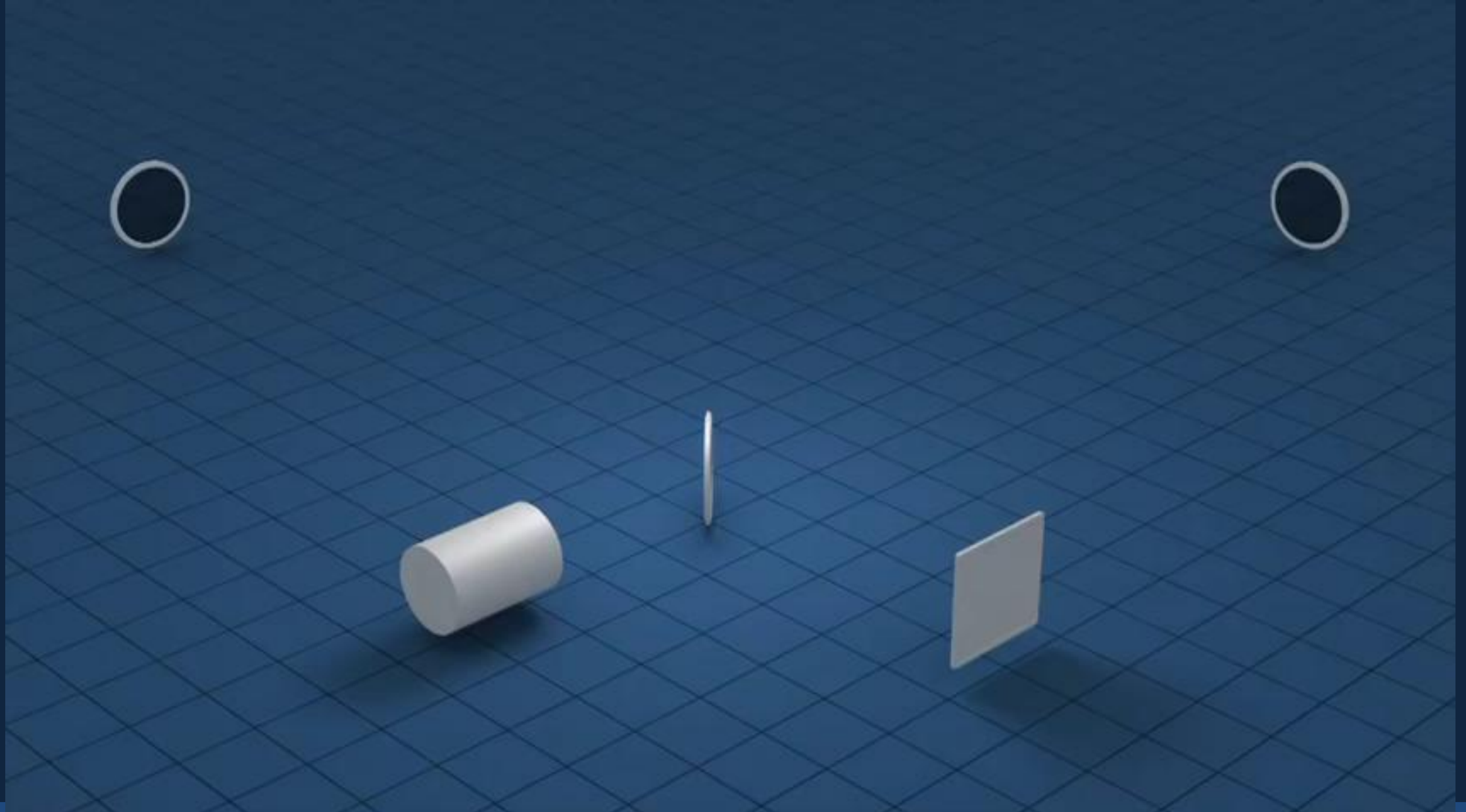


A. アインシュタイン
(by F. Schmutzer, Wikipedia)

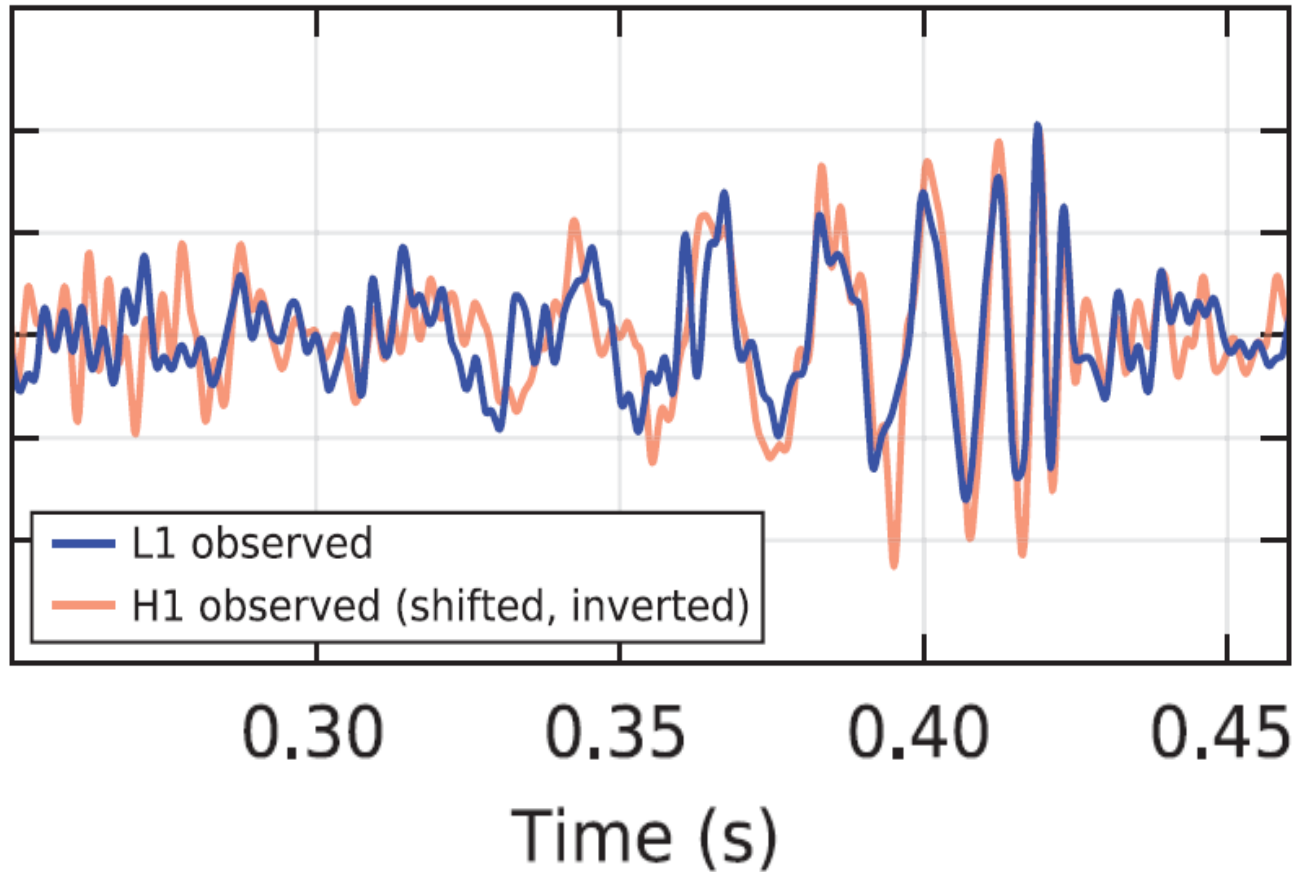
アインシュタインはほぼ
100年前、一般相対性理
論によれば重力の波(空
間が歪み伸び縮みする)
が真空中を伝わるはず
だと、予言しました。



<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160211>



重力波の初観測 (LIGO, 2015.9.14)



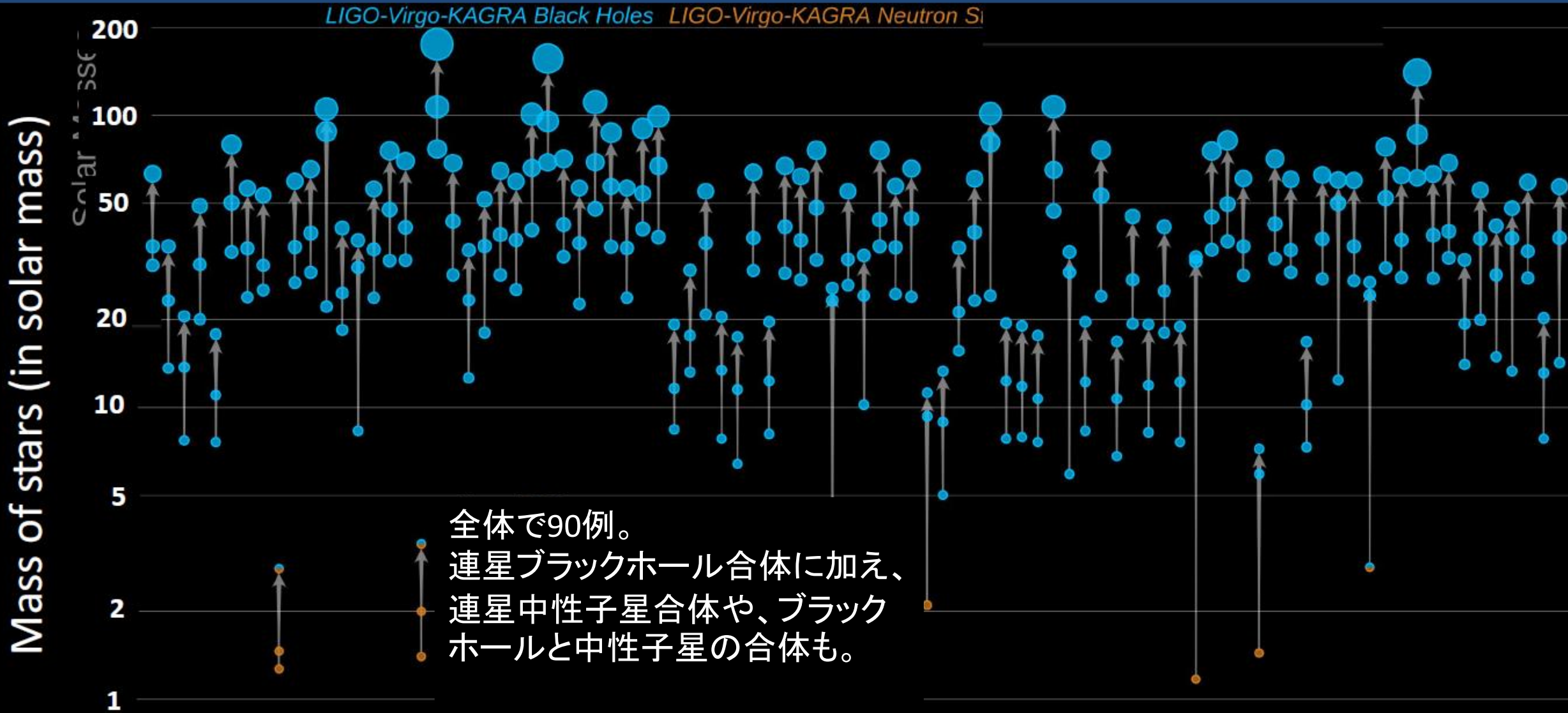
アメリカにある2台の検出器で
同じ信号(7ミリ秒違い)を観測

13億光年先で、太陽の36倍と
29倍の質量を持つブラックホー
ルが合体して、太陽の62倍の
質量を持つブラックホールがで
きました。

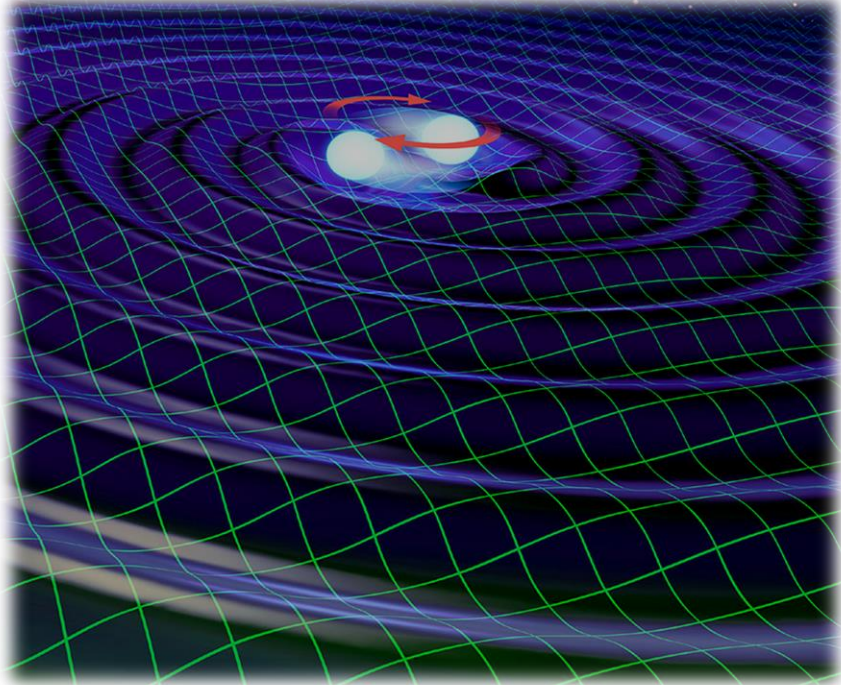
ところで、 $36 + 29 = 65$ 。つまりこのとき太陽の3倍の質量が消えて、重力波のエネルギーとなりました。このエネルギーは太陽がこの間(~0.2秒)放出するエネルギーの約100億倍の1兆倍。天の川銀河全体の放出エネルギーの約300億倍。

今までの観測のまとめ

https://www.ligo.org/science/Publication-03bCatalog/images/12_GWTC-3_Stellar_Graveyard_no_EM.png

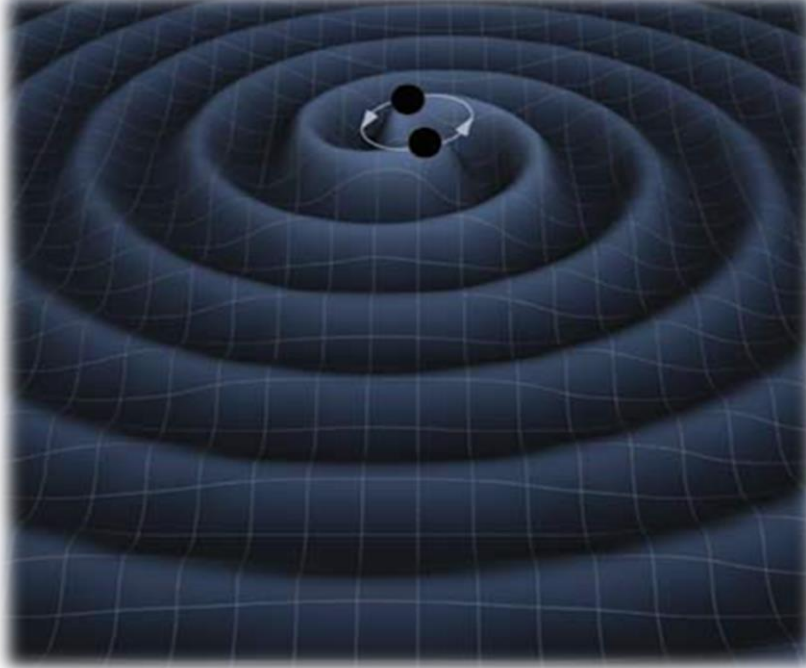


重力波で調べる宇宙の謎



中性子星連星の合体

→ 金やプラチナなどはどうのようにつくられたの？ (2017年10月にかなりわかりました。)



ブラックホール連星の合体

→ そもそもブラックホールはどうのようにつくられたの？

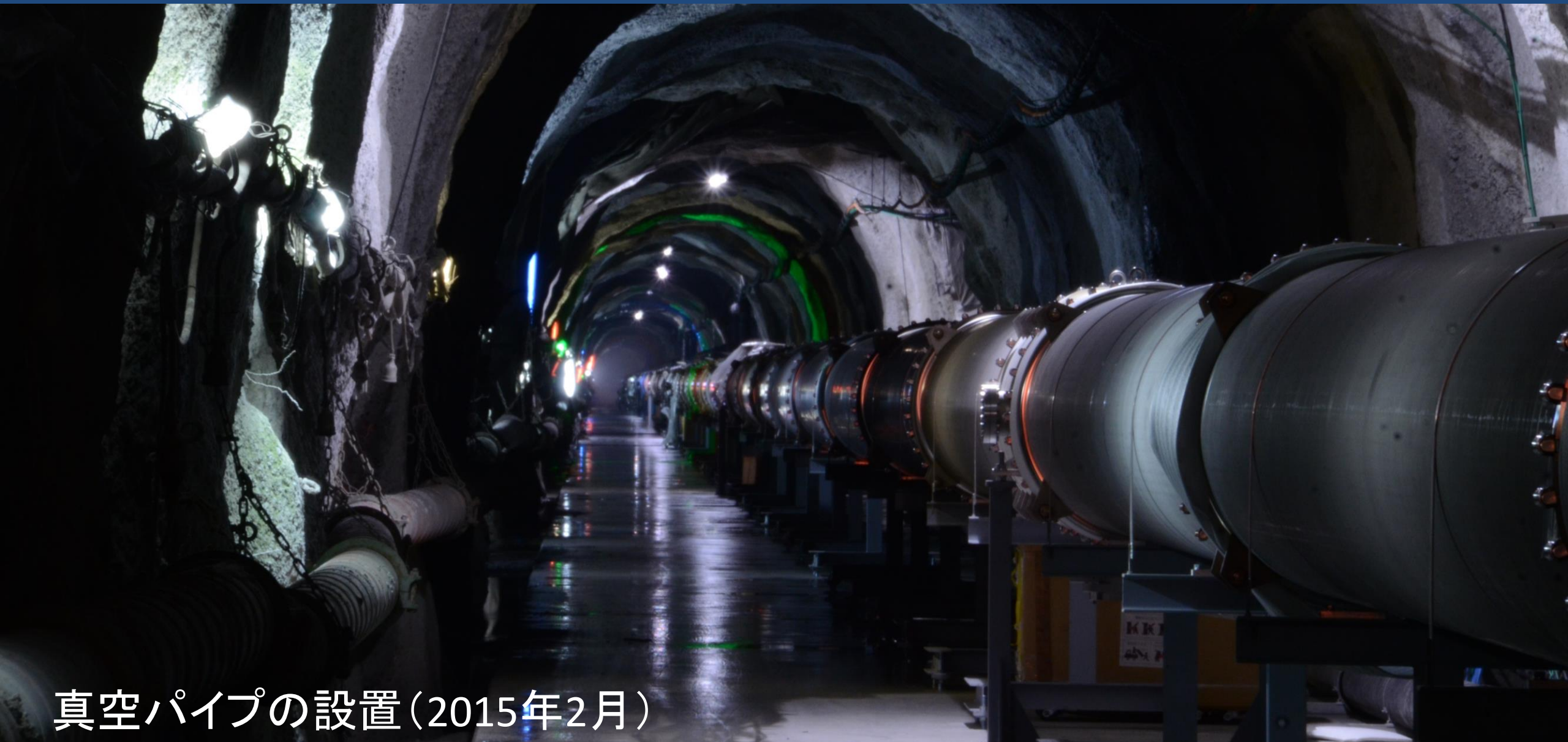


超新星爆発

→ 重い星はその一生をどのように終えるの？

重力波望遠鏡 KAGRA



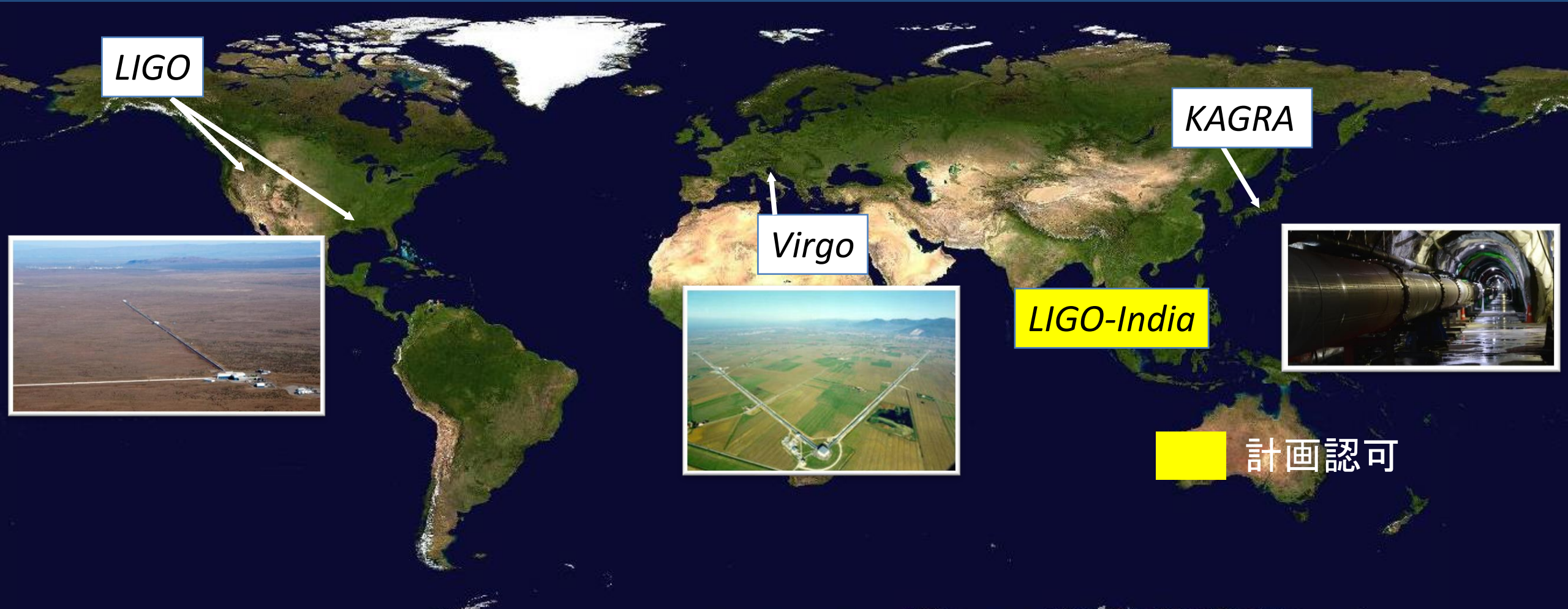


真空パイプの設置(2015年2月)



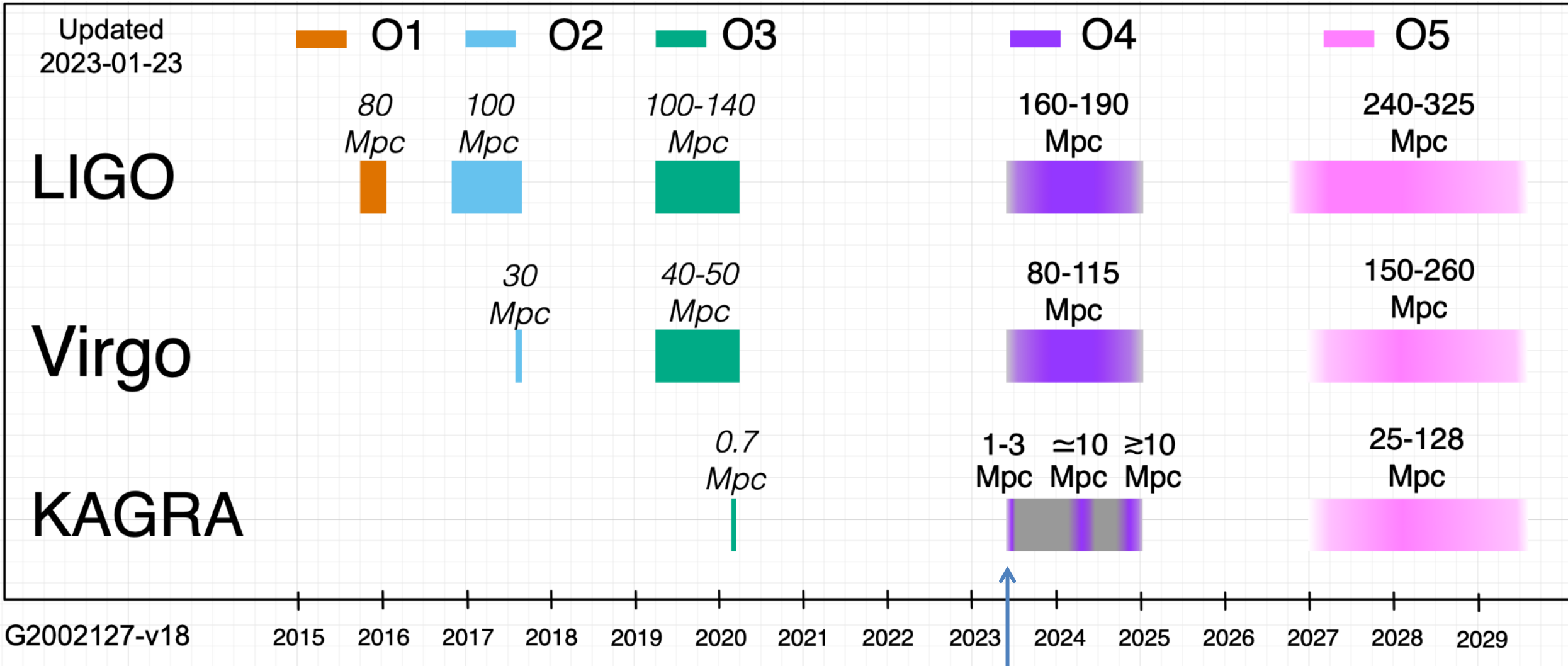
(Spring 2020)

世界の重力波測定器



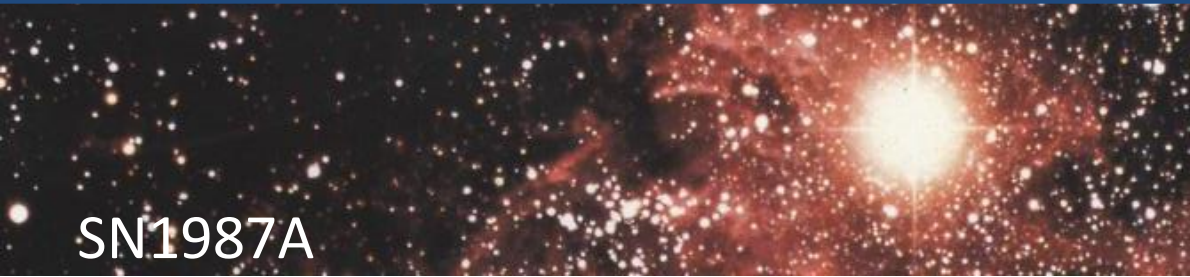
世界の重力波検出器で協力して観測し、科学成果を最大化します。
例：重力波がどこから来たか測ります。

今後の予定



5月24日(日本時間25日0時)に
O4 観測開始!

超新星爆発と重力波とニュートリノ(とガンマ線)



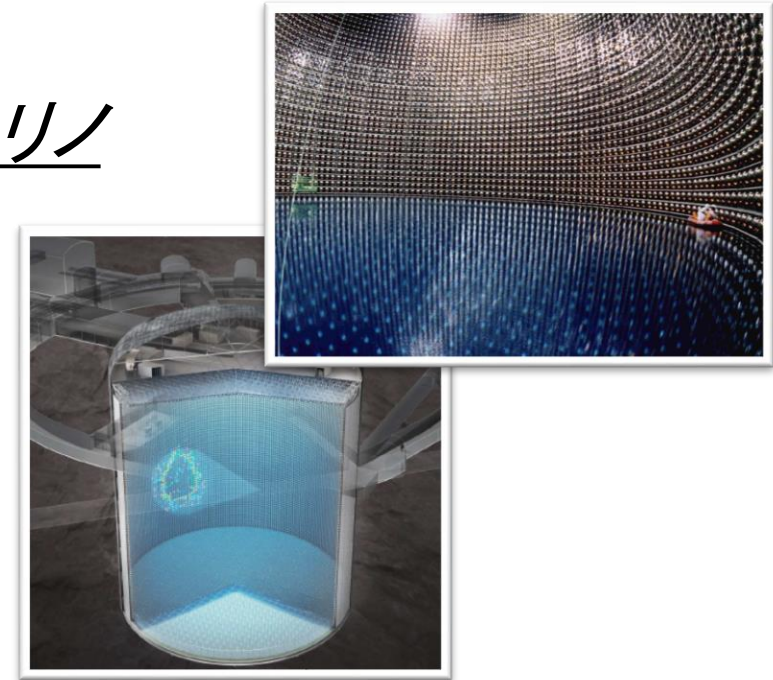
もし、銀河中心で超新星爆発が起こったとすると(ただし、だいたい50年に一度?):



重力波

ニュートリノ

超新星爆発のメカニズムをきちんと理解



(そして、ガンマ線で輝き、宇宙線も加速されるでしょう。)
→ 超新星爆発が宇宙の中で果たしている役割を理解。

光ではわからない宇宙の謎

宇宙の物質の謎

宇宙のはじまり(ビッグバンの頃)

1,000,000,001 個
の陽子(物質)

+

1,000,000,000 個
の反陽子(反物質)

=

今

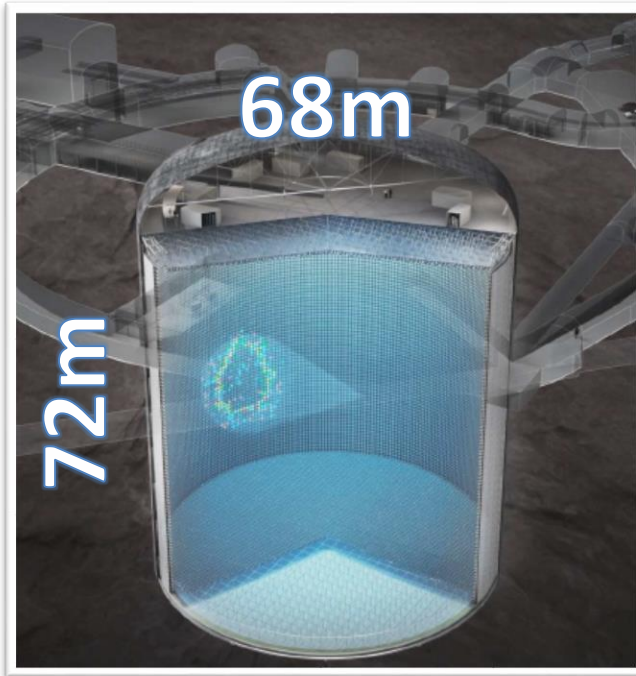
1 個
の陽子(物質)



宇宙の物質の起源に小さい質量をもったニュートリノの関わっているのでは
M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B 174 (1986) 45-47

すばる望遠鏡(<https://subarutelescope.org/jp/gallery/pressrelease/2015/06/22/173.html>)

宇宙の物質の起源の検証へ



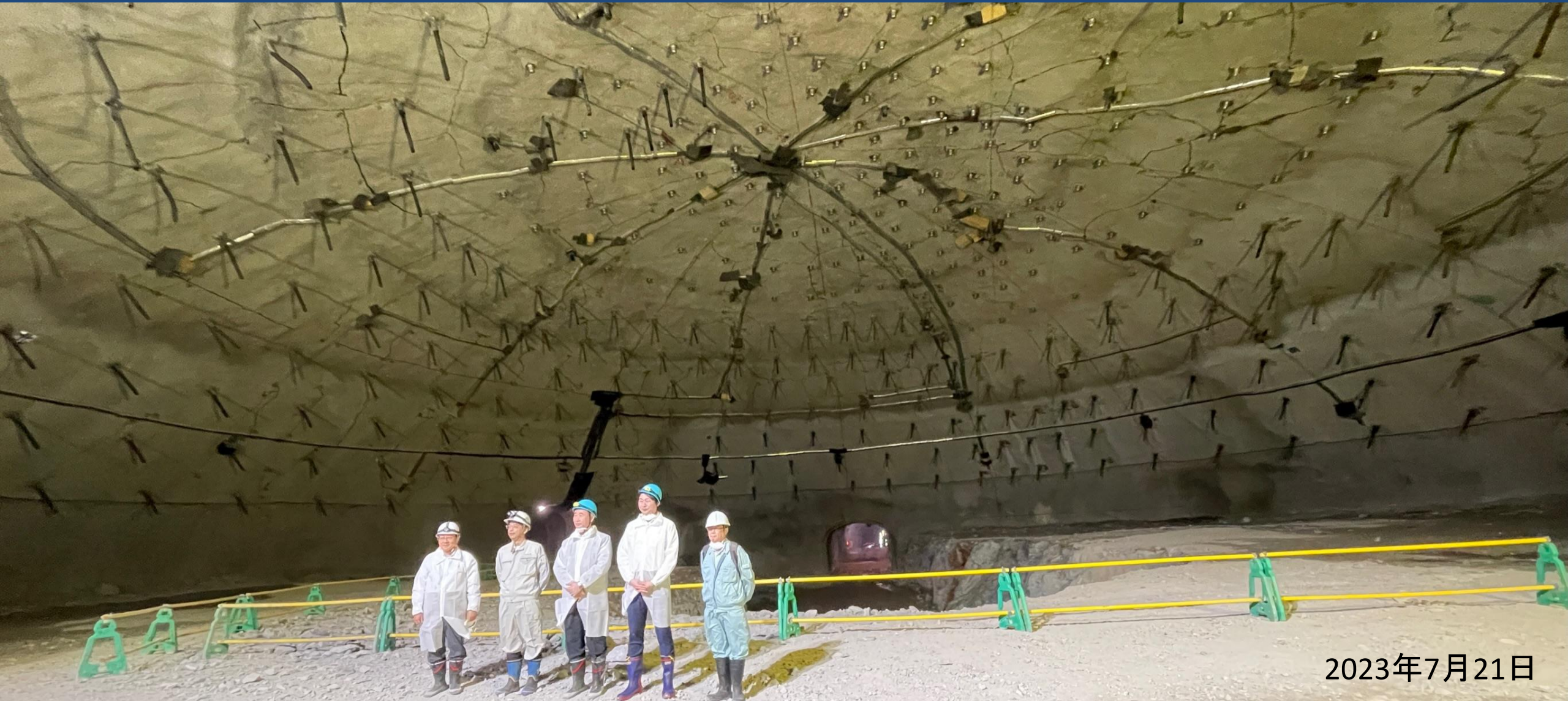
J-PARC大強度加速器
(約2.6倍に増強)



ハイパー・カミオカンデ
総重量26万トン(研究に使える水の重量はSKの約8倍)

- ✓ J-PARC加速器でニュートリノと反ニュートリノを別々に生成して神岡に向けて飛ばし、ハイパー・カミオカンデで「ニュートリノのニュートリノ振動」と「反ニュートリノのニュートリノ振動」に違いがあるか否か調べ、世界に先駆けて宇宙の物質の起源の謎に挑みます。

Hyper-Kamiokande

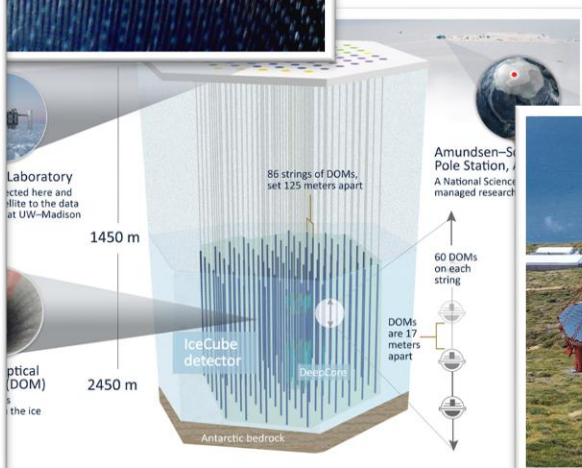
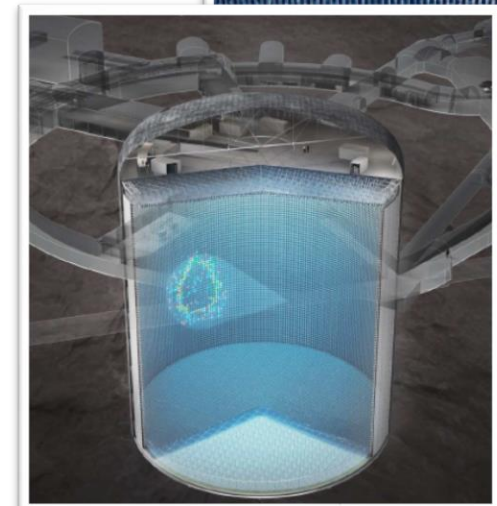
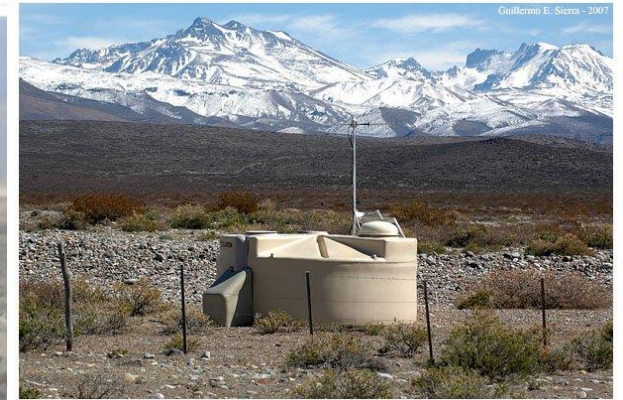
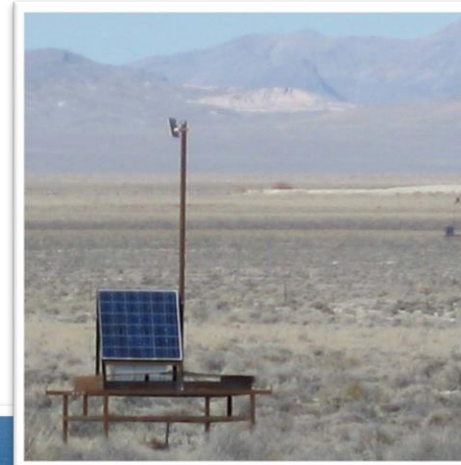
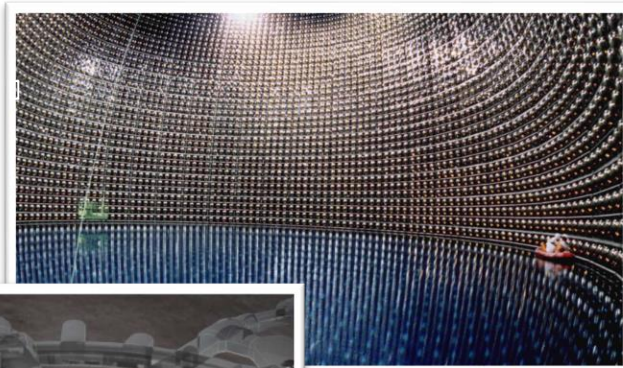


2023年7月21日

2020年に建設開始。(まだ直径70mの天井掘削完了の少し前。) **実験開始は2027の予定!**

まとめ

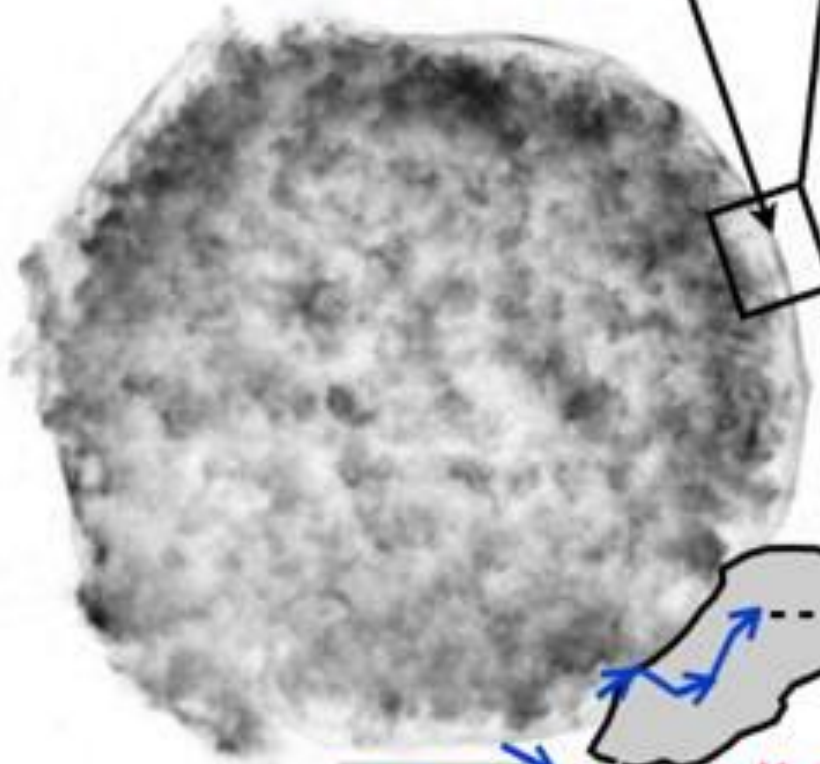
- 様々な手段を使って宇宙を調べる時代が始まっています。
- 光では調べられない宇宙の姿が見え始めました。
- これからもいろいろな大発見があると思います。ご期待ください。



超新星残骸での宇宙線加速

超新星残骸

超新星爆発が星間空間に駆動した衝撃波



宇宙線 (低エネルギー)

フェルミ加速

荷電粒子が衝撃波を往復する毎にエネルギーを獲得するメカニズム



宇宙線 (高エネルギー)

宇宙線

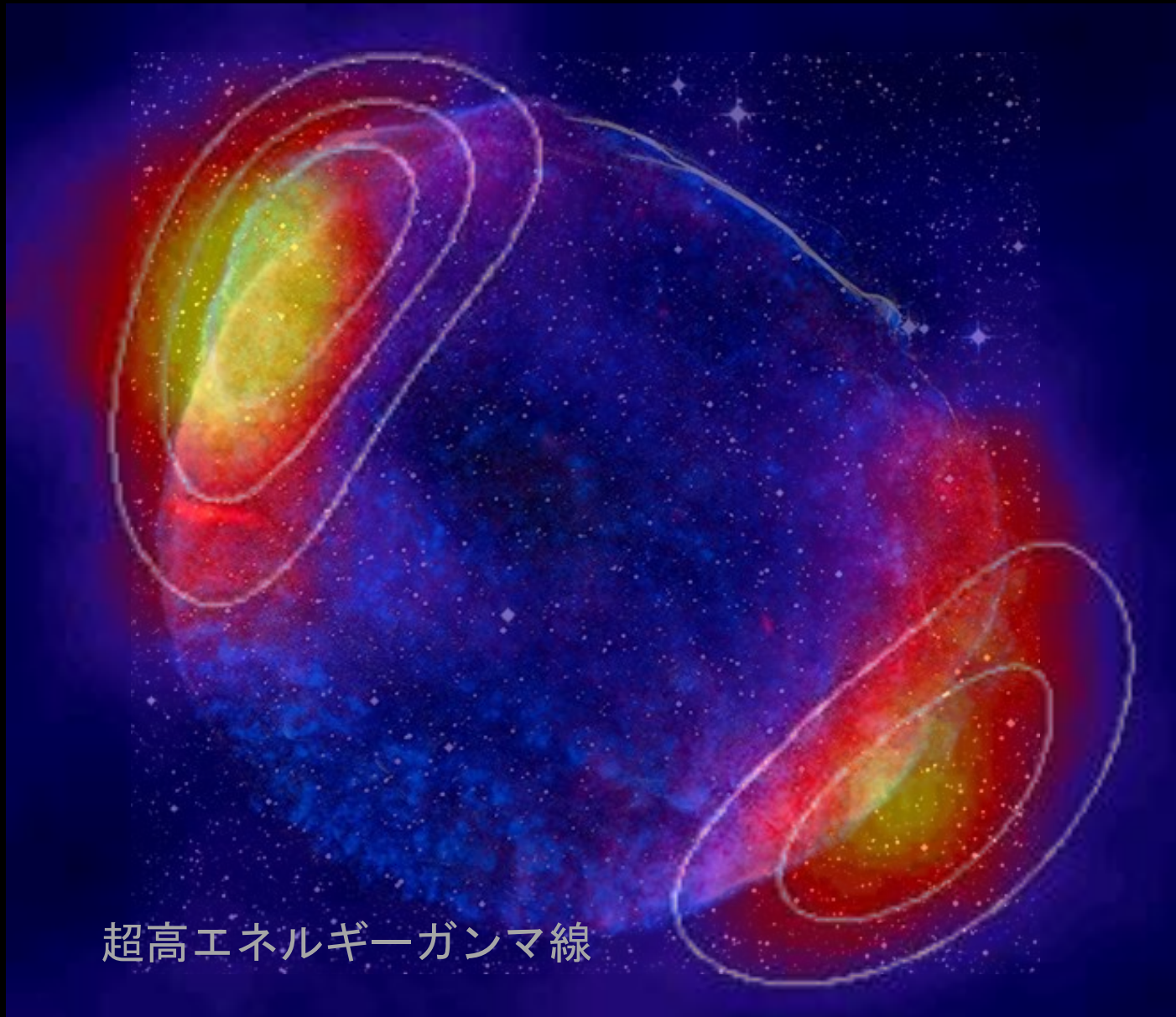
分子雲

(パイ中間子崩壊による)

ガンマ線



1000年前の超新星(SN1006)



(Credit: X-ray: NASA/CXC/Rutgers/G. Cassam-Chenai, J. Hughes et al.; Radio: NRAO/AUI/NSF/GBT/VLA/Dyer, Maddalena & Cornwell; Optical: Middlebury College/F. Winkler, NOAO/AURA/NSF/CTIO Schmidt & DSS)

Simulated Supernova

As Seen in Real-Time by Super-K



Movie by: Cully Little

Acknowledgments: this movie made use of the tscan event display (primary author Tomasz Barszczak), Super-K collaboration software tools and the previous efforts of Steve Farrell and Ben Reed.

銀河中心で超新星爆発が起これば約10秒間で約10,000のニュートリノ反応！

Credit: Duke University Neutrino Group